

Connaître, évaluer, protéger

Effets sanitaires liés aux expositions professionnelles à des mélanges gazeux respiratoires autres que l'air dans le cadre des activités hyperbares

Avis de l'Anses
Rapport d'expertise

Mai 2015 Édition scientifique
Version révisée d'un rapport publié en octobre 2014



Connaître, évaluer, protéger

Effets sanitaires liés aux expositions professionnelles à des mélanges gazeux respiratoires autres que l'air dans le cadre des activités hyperbares

Avis de l'Anses
Rapport d'expertise

Mai 2015 Édition scientifique
Version révisée d'un rapport publié en octobre 2014



Le directeur général

Maisons-Alfort, le 22 mai 2015

AVIS révisé
de l'Agence nationale de sécurité sanitaire de l'alimentation, de l'environnement et du travail

relatif aux « Effets sanitaires liés aux expositions professionnelles à des mélanges gazeux respiratoires autres que l'air dans le cadre des activités hyperbares», annule et remplace l'avis du 1er octobre 2014[1]

L'Anses met en œuvre une expertise scientifique indépendante et pluraliste.
L'Anses contribue principalement à assurer la sécurité sanitaire dans les domaines de l'environnement, du travail et de l'alimentation et à évaluer les risques sanitaires qu'ils peuvent comporter.
Elle contribue également à assurer d'une part la protection de la santé et du bien-être des animaux et de la santé des végétaux et d'autre part l'évaluation des propriétés nutritionnelles des aliments.

Elle fournit aux autorités compétentes toutes les informations sur ces risques ainsi que l'expertise et l'appui scientifique technique nécessaires à l'élaboration des dispositions législatives et réglementaires et à la mise en œuvre des mesures de gestion du risque (article L.1313-1 du code de la santé publique).

Ses avis sont rendus publics.

L'Anses a été saisie le 14 février 2013 par la Direction Générale du Travail (DGT) pour la réalisation de l'expertise suivante : Effets sanitaires liés aux expositions professionnelles à des mélanges gazeux respiratoires autres que l'air dans le cadre des activités hyperbares.

1. CONTEXTE ET OBJET DE LA SAISINE

L'ancienne réglementation relative aux travailleurs intervenant en milieu hyperbare était issue du décret n° 90-277 du 28 mars 1990 et de ses arrêtés d'application, notamment l'arrêté du 15 mai 1992 définissant les procédures d'accès, de séjour, de sortie et d'organisation du travail en milieu hyperbare. Cette réglementation, très marquée par les activités de travaux subaquatiques, était devenue difficilement applicable pour certains autres secteurs d'activités, notamment les milieux scientifiques et techniques. Un nouveau décret a donc été publié le 11 janvier 2011 (décret n°2011-45). Ce décret vise non seulement à améliorer la sécurité des travailleurs intervenant en milieu hyperbare mais également à créer un socle réglementaire commun qui harmonise, autant que possible, les règles techniques applicables aux différentes activités hyperbares afin notamment, d'en accroître la lisibilité. Des arrêtés, pris pour chacun des secteurs d'activités concernés, sont en cours de rédaction et précisent les dispositions particulières qui leur sont propres. Plusieurs arrêtés complémentaires[2] au décret ont été publiés depuis et encadrent les activités des mentions A et B.

[1] Voir Annexe 1.

[2] Arrêté du 30 octobre 2012 définissant les procédures d'accès, de séjour, de sortie et d'organisation du travail pour les interventions en milieu hyperbare exécutées avec immersion dans le cadre de la mention B « techniques, sciences et autres interventions ». NOR: ETST1229456A, ORF n°0266 du 15 novembre 2012 page 18067 texte n° 20.
Arrêté du 30 octobre 2012 relatif aux travaux subaquatiques effectués en milieu hyperbare (mention A). NOR: ETST1229420A, ORF n°0290 du 13 décembre 2012 page 19490 texte n° 32.

Cette nouvelle réglementation comporte des avancées en matière de prévention des risques professionnels, néanmoins, elle ne prévoit pas de dispositions particulières pour la mise en œuvre des techniques nouvelles (la plongée utilisant les recycleurs) ou non couvertes par les dispositions réglementaires précédentes (l'apnée).

Pour assurer la construction du cadre réglementaire adapté à l'exercice de l'ensemble de ces pratiques, la Direction générale du travail (DGT) a saisi l'Anses en date du 14 février 2013 afin de solliciter une expertise concernant les effets sanitaires liés aux expositions professionnelles à des mélanges gazeux respiratoires autres que l'air dans le cadre des activités hyperbares.

Dans ce contexte d'extension de la réglementation à de nouveaux champs, il est demandé à l'Anses d'apporter des éléments concernant les points suivants :

- Identifier et caractériser les populations concernées par le travail en conditions hyperbares, tous secteurs confondus (activités exercées, effectifs, classes d'âges…) ainsi que les conditions d'utilisation des matériels et mélanges gazeux respiratoires autres que l'air (types de matériels utilisés, mélanges gazeux utilisés, durée et fréquence d'utilisation…).
- Définir les effets sanitaires (à court et long terme) sur l'organisme liés à l'usage des matériels et mélanges gazeux identifiés. Une attente plus particulière concerne l'utilisation des appareils à recyclage de gaz, les « recycleurs », pour lesquels un complément d'information sur les pratiques et usages à l'étranger ainsi que l'accidentologie au niveau international pourra être réalisé.
- En complément, un focus est demandé sur la pratique de l'apnée dans le cadre d'activités professionnelles (scientifiques, archéologie, pêche…) afin d'évaluer l'accidentologie liée à cette pratique, les conséquences physiologiques et le cas échéant, d'émettre les recommandations pertinentes associées.

La délimitation du champ de l'expertise a été orientée selon les attentes de la DGT au regard de l'évolution actuelle des textes réglementaires. Les interrogations du Ministère concernaient en priorité les effets sanitaires liés à l'utilisation professionnelle de systèmes de plongée à circuit-ouvert avec des mélanges gazeux respiratoires autres que l'air, l'utilisation des recycleurs et la pratique de l'apnée.
Les questions relatives aux plongées profondes à saturation plus limitées et très encadrées, ne sont donc pas traitées dans le cadre de cette expertise, même si elles impliquent la respiration de mélanges gazeux autres que l'air.

2. ORGANISATION DE L'EXPERTISE

L'expertise a été réalisée dans le respect de la norme NF X 50-110 « Qualité en expertise – Prescriptions générales de compétence pour une expertise (Mai 2003) ».

L'instruction de cette saisine a été réalisée par l'unité d'évaluation des risques liés à l'air, avec l'appui de 5 experts rapporteurs externes nommés *intuitu personae* spécifiquement dans le cadre de ces travaux. Leurs domaines de compétences sont les suivants : toxicologie, physiologie, connaissance des activités professionnelles en milieu hyperbare, connaissances des usages et des procédés de contrôle des matériels et mélanges gazeux respiratoires utilisés, médecine hyperbare, *etc.*

La collecte des informations nécessaires à la réalisation de cette expertise a consisté pour partie, en la réalisation d'une recherche bibliographique (revues à comité de lecture, ouvrages de

Arrêté du 31 juillet 2014 relatif aux interventions secours et sécurité en milieu aquatique et hyperbare. NOR: INTE1404626A, JORF n°0185 du 12 août 2014 page 13483 texte n° 44.

référence ou littérature grise), complétée par l'interrogation des acteurs français et internationaux du domaine de l'hyperbarie professionnelle.

Les données relatives aux profils de population et aux pratiques propres à chaque filière proviennent essentiellement des entretiens réalisés auprès des professionnels des domaines d'activité concernés. Les acteurs pertinents identifiés ont été interrogés sous forme d'enquêtes (échange téléphonique ou par courrier électronique) ou d'auditions (entretiens *de visu*), sur la base d'un questionnaire élaboré conjointement par les rapporteurs et l'Anses afin de répondre aux questions posées par la saisine. Le contenu de ce dernier visait ainsi à décrire les populations professionnelles concernées par le travail en conditions hyperbares (incluant la pratique de l'apnée), les matériels et mélanges gazeux respiratoires utilisés et à préciser les effets sanitaires sur l'organisme associés.

Une consultation internationale des agences ou autorités nationales dans les domaines de la sécurité sanitaire et/ou du travail en Europe et en Amérique du Nord (Etats-Unis et Canada) a été initiée au mois d'octobre 2013 par voie électronique. Cette enquête a permis de préciser principalement le cadre législatif relatif aux activités professionnelles en conditions hyperbares mais a également apporté des informations sur l'encadrement législatif des recycleurs, la pratique de l'apnée professionnelle, l'utilisation des mélanges gazeux et leur contamination.

L'Anses analyse les liens d'intérêts déclarés par les experts avant leur nomination et tout au long des travaux, afin d'éviter les risques de conflits d'intérêts au regard des points traités dans le cadre de l'expertise.

Les déclarations d'intérêts des experts sont rendues publiques *via* le site internet de l'Anses (www.anses.fr).

3. CONCLUSIONS ET RECOMMANDATIONS DE L'AGENCE

Le décret n° 2011-45 du 11 janvier 2011 définit le milieu hyperbare comme un milieu dans lequel les travailleurs sont appelés à intervenir à une pression relative supérieure à 100 hPa dans l'exercice de leurs activités réalisées en immersion ou au sec. La pression relative considérée est définie comme la pression absolue au niveau des voies respiratoires du travailleur, au moment où elle atteint sa valeur maximale pendant la durée de travail, diminuée de la pression atmosphérique locale.

Description des mentions/pratiques/populations

Les travailleurs en hyperbarie interviennent en milieu immergé (scaphandriers, scientifiques, militaires, secours…) ou sans immersion (tubistes, personnel accompagnant des caissons…). Les interventions en milieu hyperbare nécessitent une adaptation du travailleur à un environnement professionnel très particulier.

En France, le décret n° 2011-45 du 11 janvier 2011 encadre la pratique des activités professionnelles en conditions hyperbares. Pour intervenir dans un environnement pressurisé, tout travailleur doit être titulaire d'un certificat d'aptitude à l'hyperbarie (CAH) dont la Mention et la Classe spécifient respectivement le type d'activités professionnelles exercées et les zones de pressions (profondeurs) autorisées. La Mention A concerne les travaux subaquatiques (activités des scaphandriers) ; la Mention B regroupe différents types d'interventions subaquatiques parmi lesquelles les activités physiques ou sportives, l'archéologie sous-marine, la défense, la sécurité civile, *etc.* ; la Mention C concerne les interventions sans immersion pour les personnels affectés à la mise en œuvre des installations hyperbares médicales (médecins, infirmiers, aides-soignants, techniciens, *etc.*) ; la Mention D concerne principalement les travaux sans immersion effectués par les tubistes dans les tunneliers.

Si la réglementation actuelle définit les méthodes d'interventions et les mélanges gazeux respiratoires autorisés en fonction des secteurs d'activités, elle ne prévoit pas de dispositions particulières pour la mise en œuvre des recycleurs ou la pratique de l'apnée.

Ce constat apparait similaire au niveau international. Suite à une consultation internationale initiée par l'Anses, de nombreuses références ont été recueillies traitant avant tout des principes d'organisation, de responsabilité, de formation, de sécurité du matériel, *etc*. Plusieurs textes ou normes évoquent les mélanges gazeux autres que l'air ainsi que la vérification visant à éviter la contamination du mélange gazeux ou de l'air. Quelques éléments ont également pu être collectés directement ou indirectement concernant les recycleurs, les correspondants répondant que les consignes ou les prescriptions s'appliquant au matériel et à l'équipement s'étendent *de facto* aux recycleurs. Enfin, très peu d'éléments ont été transmis concernant l'encadrement de l'apnée professionnelle.

D'après les éléments recensés auprès des différents acteurs interrogés au cours de cette expertise, le nombre total de travailleurs exposés aux conditions hyperbares en France est estimé à 10 000 personnes. Les domaines d'activité représentés sont très diversifiés, de même que les méthodes d'intervention en milieu hyperbare qui sont propres à chaque métier.

- **Interventions aux mélanges gazeux respiratoires autres que l'air**

Sur un plan sanitaire, tout travailleur hyperbare est soumis aux risques inhérents à son activité auxquels s'ajoutent les risques spécifiques liés à l'environnement hyperbare. Ces derniers sont liés à l'adaptation de l'organisme aux variations de la pression extérieure ainsi qu'aux variations de pressions partielles des différents gaz respirés. Toute variation d'un ou plusieurs de ces paramètres peut entraîner des perturbations plus ou moins graves, avec toutefois une certaine marge de tolérance, voire même d'accoutumance. Ainsi un effet d'adaptation n'entrainera pas nécessairement un effet néfaste sur l'organisme humain. Néanmoins, l'exposition à des conditions hyperbares peut conduire à des manifestations pathologiques aiguës ou chroniques (barotraumatismes, intoxications dues aux gaz inhalés, accidents de désaturation…), de sévérité variable (de la simple gêne au niveau des oreilles jusqu'au décès), apparaissant pendant ou après un séjour à une pression supérieure à la pression atmosphérique. Les conditions de travail en milieu contraignant (milieu aqueux, souterrains, activités de soudage, *etc*) peuvent également entraîner des accidents spécifiques à l'activité exercée.

Toutes mentions confondues et quelle que soit la technique d'intervention mise en œuvre, l'air est le mélange gazeux respiratoire le plus utilisé pour les interventions en conditions hyperbares. Néanmoins, son utilisation se heurte aux limites physiologiques liées à la toxicité des gaz respiratoires et en particulier de l'azote (risques de narcose, d'accident de désaturation et d'essoufflement), ainsi qu'à des limites techniques. Le risque de survenue d'une narcose à l'azote devient important pour tous les travailleurs intervenant à l'air à partir de 6 bars de pression absolue (profondeur équivalente de 50 mètres).

Les interventions hyperbares réalisées en respirant des mélanges gazeux autres que l'air permettent de pallier certaines contraintes physiologiques imposées par la plongée à l'air. La réglementation définit les gaz respiratoires autorisés lors des interventions en conditions hyperbares ainsi que les exigences à respecter en termes de composition de ces gaz (pressions partielles maximales, concentrations limites des polluants). Les interventions aux mélanges sont déjà très développées dans certains secteurs professionnels de la Mention B (défense, sécurité civile, spéléologie, photo-vidéographie sous-marine, *etc.*) et leur mise en œuvre dans les bonnes conditions, permet d'apporter une sécurité plus importante en cours d'intervention.

De nombreuses publications étudient spécifiquement les effets sanitaires liés à la respiration d'oxygène pur en conditions hyperbares dans un contexte professionnel, principalement pour la décompression ou le traitement médical, et une littérature moindre analyse les autres mélanges gazeux. Cependant, de nombreux ouvrages de référence sur les principes théoriques relatifs aux effets des gaz apportent des informations sur les avantages et les inconvénients sur le plan sanitaire des mélanges gazeux.

L'utilisation des mélanges gazeux respiratoires autres que l'air lors des interventions hyperbares présente l'avantage de diminuer (fortement dans le cas de l'Héliox) les risques d'effets narcotiques liés aux gaz inertes. Techniquement, la mise en œuvre de ces pratiques est plus onéreuse que

l'usage d'air comprimé, de par la nécessité d'un équipement spécifique et le fait que l'approvisionnement et la fabrication des mélanges soient plus complexes.

Le tableau suivant présente les intérêts et inconvénients, tant sur le plan sanitaire qu'en termes technique et de confort d'utilisation, de l'utilisation des mélanges gazeux autres que l'air.

Tableau de synthèse des propriétés spécifiques à la composition de chaque type de mélange

Mélange gazeux respiratoire	**Sur le plan sanitaire**		**Au niveau technique et en termes de confort d'utilisation**	
	Avantages par rapport à l'air	***Inconvénients par rapport à l'air***	***Avantages par rapport à l'air***	***Inconvénients par rapport à l'air***
Paliers de décompression à l'O_2 pur et aux mélanges suroxygénés	limitation du risque d'accident de désaturation (ADD)	risque d'hyperoxie (crise convulsive, décompensation cardiorespiratoire)	- optimisation de la décompression - réduction de la durée des paliers de décompression - réduction de la fatigue - réduction de la durée en surface entre 2 interventions successives	risques d'incendie pour une utilisation en atmosphère sèche
NITROX en mélange fond (mélange binaire N_2/O_2 avec 30 à 60 % d'O_2)	- limitation du risque d'ADD - limitation du risque de narcose	risque d'hyperoxie	- optimisation de la décompression (lors de l'utilisation du Nitrox suivant un profil de décompression à l'air) - réduction de la durée des paliers de décompression - réduction de la fatigue - réduction de la durée en surface entre 2 interventions successives	limitation de la pression maximale (ou profondeur) d'intervention
NITRHELIOX (mélange ternaire $N_2/He/O_2$)	- diminution des risques : ○ d'hyperoxie ○ d'hypercapnie - amélioration des performances ventilatoires et diminution du risque d'essoufflement	refroidissement de l'organisme	augmentation de la pression maximale (ou profondeur) d'intervention	Mélanges constitués d'hélium : - augmentation de la durée des paliers de décompression - prix élevé de l'hélium
HELIOX (mélange binaire He/O_2)	amélioration des performances ventilatoires et diminution du risque d''essoufflement	- refroidissement de l'organisme	augmentation importante de la pression maximale (ou profondeur) d'intervention	

- ### Interventions en recycleur

Les recycleurs sont des équipements autonomes pour le travail hyperbare qui récupèrent les gaz expirés pour les réutiliser, évitant au travailleur d'être équipé de nombreuses bouteilles de gaz. Ils offrent au travailleur une autonomie et une aisance supérieures à celles apportées par les appareils à circuit ouvert et présentent plusieurs avantages, suivant leur mode de fonctionnement (circuit fermé et semi-fermé ; à régulation mécanique ou électronique) : augmentation du temps de l'intervention sous pression, stabilisation de la pression partielle en oxygène, limitation des contraintes thermiques, *etc*. Les limites de ces appareils en matière de sécurité d'intervention concernent principalement la gestion électronique des paramètres de l'intervention, susceptible d'atténuer l'attention du travailleur et sujette aux pannes (le solénoïde et les cellules oxygène notamment).

Sur un plan sanitaire, en dehors des accidents de désaturation (ADD) et des accidents barotraumatiques dont la survenue est en général indépendante du type d'appareil respiratoire utilisé, il existe d'autres accidents survenant lors des interventions en conditions hyperbares liés directement à l'emploi des mélanges et des recycleurs. Ces accidents sont pour la plupart des

accidents biochimiques (hypoxie, hyperoxie et hypercapnie) liés le plus souvent à un défaut de fonctionnement du recycleur ou à un non-respect des consignes d'utilisation de l'appareil par le travailleur. Le risque le plus important des accidents biochimiques reste la perte de connaissance qui, en milieu aquatique, peut en l'absence de précautions spécifiques, engendrer la noyade dont l'issue est presque toujours fatale. Les accidents cardio-vasculaires d'immersion peuvent être favorisés par l'emploi du recycleur.

L'utilisation des recycleurs n'est pas prévue par la réglementation, expliquant qu'elle reste encore confidentielle. Certains secteurs professionnels de la Mention B tels que la défense, la spéléologie ou la photo-vidéographie sous-marine ont néanmoins développé l'usage de ce type d'appareils. Une utilisation de cette technique lors de plongées plus classiques pourrait s'avérer pertinente en termes de sécurité parce qu'elle permet une durée de survie plus longue en cas d'incident et offre la possibilité de gérer l'incident, même à grande profondeur, permettant par exemple au plongeur de regagner la tourelle ou la bulle de plongée afin d'être remonté.

Peu de références bibliographiques sur l'accidentologie et les effets aigus ou chroniques en lien avec l'usage des recycleurs dans un contexte professionnel ont été recensées. Des retours d'expérience sont disponibles, mais ils concernent principalement les activités de la Marine nationale. Une analyse des accidents liés à l'utilisation des recycleurs et mélanges de gaz au sein de la Marine nationale sur une période d'environ 20 ans a permis d'estimer le risque d'accident à 1 sur 6000 plongées. Les accidents les plus fréquents sont les accidents biochimiques (60% de l'ensemble des accidents, répartis en 40% d'hypercapnie, 30% d'hyperoxie et 30% d'hypoxie) qui surviennent quel que soit le type de recycleur, suivis par les ADD (15% : recensés avec l'utilisation de mélanges Nitrox à 40% ou 30% d'O_2), beaucoup moins fréquents qu'en plongée à l'air. Sur ces 20 années analysées, 3 décès ont été recensés ; 2 à l'oxygène pur et 1 au mélange ternaire. La population des militaires est caractérisée par sa jeunesse, sa condition physique, la rigueur de ses procédures et de leur mise en œuvre ; par ailleurs, les profils d'intervention sont principalement des plongées carrées[3]. Il est ainsi difficile d'extrapoler ces données aux autres secteurs d'activité qui ne bénéficient pas du même contexte d'application.

- **Interventions en apnée**

L'apnée est une pratique fondamentalement différente de la plongée en scaphandre autonome. Sa mise en œuvre dans un cadre professionnel demeure encore ponctuelle mais se développe au sein de la Mention B pour diverses activités telles que le contrôle visuel de l'état des cages d'élevage de poissons en mer, la pêche à la palourde, le suivi ichtyologique de la faune sous-marine et le prélèvement d'échantillons par les plongeurs scientifiques… L'atout principal de l'apnée réside dans sa souplesse d'utilisation. Il s'agit en effet d'une méthode d'intervention facile et rapide à mettre en œuvre puisqu'elle nécessite une logistique légère. Le travail en apnée est néanmoins contraint par le fait que la durée et la profondeur des incursions sont limitées.

Actuellement, le décret ne prévoit aucune formation ou aptitude spécifique pour la pratique de l'apnée professionnelle. La mise en œuvre de l'apnée dans un cadre professionnel est autorisée uniquement pour les travailleurs classés de la Mention B et sous réserve que la pression relative d'exposition ne soit pas supérieure à 1 000 hPa (10 mètres de profondeur) (exception faite des encadrants professionnels de plongée loisir qui doivent suivre les dispositions spécifiques prévues par le Code du sport). Compte tenu de la spécificité de cette pratique, il devrait être possible de la mettre en œuvre indépendamment d'une qualification à la plongée en scaphandre autonome.

L'apnée n'expose pas le plongeur aux mêmes risques sanitaires que lors d'une plongée en air avec bouteille et peut conduire à des pathologies spécifiques. Un accident majeur caractérise cette pratique : la syncope. Cet accident se traduit par une perte de conscience potentiellement compliquée par une noyade en l'absence de secours et justifie à lui seul, l'ensemble des dispositions préventives sécuritaires enseignées et appliquées dans le cadre de la pratique de

[3] Descente sur le fond pour une durée et une profondeur données, en modifiant très peu la profondeur.

l’activité**.** L’apnéiste est également soumis aux risques de barotraumatismes (pulmonaire, oreilles, sinus, face, dents, tube digestif…), d’accident cardio-vasculaire d’immersion, d’hypercapnie et d’accidents neurologiques (forme d’accident vasculaire cérébral), dont les mécanismes restent encore mal définis.

Par ailleurs, il existe actuellement peu de retours d’expérience ou de références bibliographiques concernant les effets à long terme induits par la pratique de l’apnée en tant que méthode d’intervention professionnelle.

L’Anses conclut que parmi les éléments recensés au cours de cette expertise, certains témoignent des nouvelles perspectives qu’offrent les mélanges gazeux autres que l’air, les recycleurs et l’apnée dans le secteur des interventions professionnelles en milieu hyperbare. Toutefois, la mise en œuvre de ces pratiques présente des risques spécifiques pour la santé des travailleurs qui imposent des recommandations en termes de matériels, de formations et de procédures. **En effet, la survenue des différents accidents identifiés dépend d’une combinaison de multiples facteurs** : en premier lieu, la nature des gaz constituant le mélange respiratoire, la pression à laquelle ces gaz vont être utilisés et le type de matériel mis en œuvre auxquels viennent s’ajouter les conditions environnementales de l’intervention et l’état de santé du travailleur.

Conformément aux attentes de la DGT sur un appui en vue de construire le cadre réglementaire, l'Anses, en se fondant sur les propositions d'experts rapporteurs, a établi une série de recommandations destinées à améliorer la sécurité et le confort des travailleurs lors des interventions en conditions hyperbares. Les recommandations ont été hiérarchisées, afin de faire ressortir les actions prioritaires à mettre en œuvre. Suivant une importance décroissante, 3 niveaux ont ainsi été associés aux différentes propositions selon qu'elles sont 1) fortement recommandées, 2) recommandées ou 3) conseillées.

- **Recommandations en termes de prévention**

GENERALITES SUR LES INTERVENTIONS EN CONDITIONS HYPERBARES

- Il est recommandé pour toutes les mentions de ne pas intervenir à l'air au-delà de 6 bars de pression absolue (profondeur équivalente : 50 mètres) pour limiter le risque important de narcose. L'utilisation de mélanges gazeux autres que l'air est ainsi fortement recommandée dans ces conditions.
- Toutefois, en cas d'interventions à l'air entre 6 et 7 bars de pression absolue (profondeurs équivalentes : 50 et 60 mètres)[4], afin de limiter le risque d'accident de désaturation (ADD), il est fortement recommandé :
  - de ne pas dépasser 10 minutes en durée de travail ;
  - d'effectuer des paliers à l'oxygène pur à 1,6 bar de pression absolue (6 mètres de profondeur).
- Afin d'assurer la traçabilité des interventions et des accidents en conditions hyperbares professionnelles :
  - Il est fortement recommandé de rajouter dans le livret individuel de suivi des interventions ou d'exécution de travaux en milieu hyperbare, une partie spécifique concernant l'utilisation des mélanges, des recycleurs et de l'apnée avec l'accidentologie spécifique, les pratiques à risque, les dysfonctionnements des matériels et les effets sanitaires à court et long terme ;
  - Il est recommandé de mettre en place une base de données nationale recensant l'ensemble des paramètres d'exposition et des accidents survenus en hyperbarie professionnelle. L'analyse des éléments collectés au sein de cette base devra s'inscrire dans une démarche de retour d'expérience associée à un processus d'assurance qualité.
- Il est recommandé que les autorités compétentes organisent le contrôle de la mise en œuvre sur le terrain de l'encadrement adapté à l'utilisation des recycleurs et des mélanges, avec une surveillance prioritaire des mélanges à base d'hélium.

[4] Situations exceptionnelles d'interventions et de travaux exécutés en milieu hyperbare prévues à l'article R. 4461-49 du Décret n° 2011-45 du 11 janvier 2011.

INTERVENTIONS AUX MELANGES GAZEUX RESPIRATOIRES AUTRES QUE L'AIR

INTERVENTIONS AUX MELANGES, TOUS TYPES DE MELANGES CONFONDUS

- Il est fortement recommandé pour toutes les mentions d'utiliser des mélanges autres que l'air pour toute intervention au-delà de 6 bars de pression absolue (profondeur équivalente : 50 mètres).
- Afin d'éviter les accidents de désaturation, il est fortement recommandé de limiter le nombre d'interventions sous pression :
  - à 1 par jour, pour toute intervention aux mélanges effectuée à une pression absolue supérieure à 6 bars ;
  - à 2 par jour, pour les interventions réalisées entre 6 et 7 bars de pression absolue avec palier de décompression aux mélanges Nitrox, sous réserve de disposer d'un caisson hyperbare et d'un personnel médical ou paramédical hyperbariste à l'aplomb du chantier.
- Il est fortement recommandé de limiter à 10 bars de pression absolue (profondeur de 90 mètres) la pression maximale autorisée pour les interventions aux mélanges en scaphandre autonome (circuit-ouvert ou recycleur). Au-delà de cette limite, la mise en œuvre de telles interventions reste possible, au cas par cas, après accord des autorités compétentes.
- Il est fortement recommandé d'adapter les cursus de formation à l'apprentissage des interventions aux mélanges en vue d'une mise en œuvre professionnelle de cette pratique, au sein d'organismes certifiés/agréés. Au moment de l'habilitation ou de la certification de ces organismes, les autorités compétentes devront s'assurer que les prérequis adaptés ont été mis en place pour intégrer les formations en question.
- Il est fortement recommandé d'appliquer les normes européennes définissant les équipements et matériels utilisés lors des interventions avec des mélanges gazeux :
  - NF EN 144-3 : 2003 / Appareils de protection respiratoire - Robinets de bouteille à gaz - Partie 3 : raccords de sortie pour gaz de plongée Nitrox et oxygène ;
  - NF EN 13949 : 2003 / Appareils respiratoires - Appareils de plongée autonome à circuit ouvert utilisant du Nitrox et de l'oxygène comprimé - Exigences, essai, marquage, etc) ;
  - NF EN 15333-1 : 2011 / Équipements respiratoires - Appareils de plongée narguilé à gaz comprimé et à circuit ouvert ; Partie 1 : Appareils à la demande ;
  - NF EN 15333-2 : 2011 / Équipements respiratoires - Appareils de plongée narguilé à gaz comprimé et à circuit ouvert ; Partie 2 : Appareils à débit continu.
- Pour les interventions aux mélanges suroxygénés, il est fortement recommandé d'utiliser du matériel « qualité oxygène » (défini par la norme NF EN 144-3 : 2003, qui précise que les produits d'entretien des matériels doivent être compatibles avec l'emploi d'oxygène).
- Il est recommandé de privilégier un approvisionnement en mélanges prêts à l'emploi (étiquetés et analysés par le fournisseur).
- En cas de transfert de mélanges gazeux prêts à l'emploi du récipient original vers un autre contenant, il est fortement recommandé que l'opérateur vérifie la conformité du mélange transféré avec les caractéristiques du mélange initial (pourcentage des gaz constitutifs du mélange).

- En cas de préparation des mélanges gazeux, il est fortement recommandé que l'opérateur respecte un délai de repos de 12h après la préparation (temps nécessaire pour obtenir la stabilité du mélange gazeux) avant de contrôler le pourcentage des gaz constitutifs du mélange et d'effectuer l'étiquetage final.

- Il est fortement recommandé de respecter des procédures spécifiques lors de l'utilisation des mélanges :
  - **Avant l'intervention**
    - Choix du mélange adapté à la pression de l'intervention ;
    - Contrôle du pourcentage d'O_2 du mélange dans la bouteille avec traçabilité dans le registre de contrôle et étiquetage de la bouteille ;
    - Montage des détendeurs spécifiques pour les mélanges sur la bouteille ;
    - Planification, mise en place d'une chronologie de l'utilisation des différents mélanges gazeux durant l'intervention (« run time ») et détermination de la profondeur limite ;
    - Choix de l'outil de décompression et réglage du pourcentage d'O_2 en cas d'utilisation d'un ordinateur.

  - **Pendant l'intervention**
    - Respect de la chronologie d'utilisation des différents mélanges gazeux, de la profondeur limite, de la durée fond du niveau maximal d'intervention et du profil de décompression ;
    - Limitation des efforts ;
    - Contrôle itératif de la PpO_2 du mélange respiré en cas d'utilisation de recycleur à PpO_2 constante.

  - **Après l'intervention**
    - Rangement du matériel spécifique à l'utilisation des mélanges, ne pas mélanger avec le matériel courant ;
    - Remplissage de la fiche d'intervention spécifique aux mélanges.

INTERVENTIONS AUX MELANGES BINAIRES N_2/O_2 (NITROX):

Les mélanges binaires N_2/O_2 ou Nitrox désignent un mélange d'air suroxygéné, c'est-à-dire dont le pourcentage d'oxygène dépasse 21%. Suivant le pourcentage d'O_2 qu'ils contiennent, ces mélanges pourront être utilisés en gaz « fond » ou en gaz de décompression.
Comparativement à l'air, l'utilisation d'un mélange Nitrox permet une optimisation de la désaturation lorsqu'il est utilisé avec un profil de décompression air et une réduction de la durée d'immersion dans les environnements contraignants.

Utilisation en gaz « fond » : Nitrox avec 30 à 60% d'O_2 // PpO_2 limitée à 1,4 bar

- L'utilisation du Nitrox en gaz fond est recommandée pour :
  - les profils « yoyo », (dites « ludion ») ;
  - les interventions successives ;
  - les interventions avec paliers de décompression ;
  - les interventions en altitude ;
  - lors d'un effort physique intense.

Par ailleurs, le Nitrox présente l'avantage d'être facile à fabriquer comparativement aux mélanges ternaires.

Utilisation en décompression : Nitrox à plus de 80% d'O_2 (« Surox ») // PpO_2 limitée à 1,6 bar

- L'utilisation du Nitrox en décompression est recommandée lors :
  - d'interventions à des pressions élevées (à partir de 5 bars soit une profondeur équivalente de 40 mètres), en respectant les limites de la prise de risque due à la toxicité de l'oxygène ;
  - d'interventions avec paliers de décompression ;
  - d'interventions avec effort physique intense ;
  - d'une procédure de rattrapage après une vitesse de remontée rapide ou un palier écourté.

INTERVENTIONS AUX MELANGES BINAIRES He/O_2 (HELIOX)

Les mélanges binaires He/O_2 ou Héliox désignent un mélange constitué d'oxygène et d'hélium.

- Pour des interventions à des pressions absolues supérieures à 8 bars ou pour la plongée profonde (au-delà de 70 mètres), l'utilisation de mélanges Héliox est conseillée comparativement aux mélanges ternaires car :
  - une table de décompression validée est disponible pour ces profils d'interventions ;
  - l'Héliox présente l'avantage d'être facile à fabriquer comparativement aux mélanges ternaires.

INTERVENTIONS AUX MELANGES TERNAIRES $N_2/He/O_2$ (NITRHELIOX)

Les mélanges ternaires $N_2/He/O_2$ ou Nitrhéliox désignent un mélange respiratoire constitué d'oxygène, d'azote et d'hélium.

- L'utilisation de mélanges Nitrhéliox est recommandée dès 6 bars de pression absolue (profondeur équivalente de 50 mètres).

DECOMPRESSION A L'O_2 PUR

- La réalisation de paliers de décompression à l'oxygène pur est fortement recommandée :
  - pour les interventions à des pressions élevées (à partir de 5 bars soit une profondeur équivalente de 40 mètres) ;
  - pour les interventions avec paliers de décompression ;
  - pour les interventions avec effort physique intense ;
  - pour les interventions des mentions C ;
  - lors d'une procédure de rattrapage après une vitesse de retour à la pression atmosphérique (soit 1 bar de pression absolue) rapide ou un palier écourté.

- En milieu humide, il est fortement recommandé de réaliser ses paliers en utilisant une ligne à paliers fixe ou dérivante.

OUTILS DE DECOMPRESSION

L'utilisation des mélanges par les professionnels intervenant en conditions hyperbares nécessite la mise à disposition par les autorités compétentes d'outils de décompression validés pour une utilisation dans un cadre professionnel.

A cet effet, il est fortement recommandé de :

- Définir une méthode permettant de valider des outils de décompression pour l'utilisation des mélanges gazeux dans un cadre professionnel ou à défaut, proposer des modèles de décompression.

- Dans l'attente, définir les critères afin de permettre l'utilisation des outils de décompression existants.

MATERIELS

- Il est fortement recommandé d'harmoniser les matériels d'intervention en milieu hyperbare au sein d'une même entreprise, notamment les matériels associés aux gaz respiratoires (détendeurs et ordinateurs d'aide à la décompression présentant les mêmes caractéristiques et adaptés aux milieux d'intervention).
- Il est fortement recommandé d'homogénéiser les techniques d'intervention mises en œuvre sur un chantier hyperbare, qu'il s'agisse des gaz respiratoires ou des matériels utilisés. La multiplicité des méthodes d'intervention sur un même chantier pour effectuer une même tâche étant source d'accidents.
- Afin d'assurer la prophylaxie des maladies transmissibles par l'intermédiaire de certains microorganismes (staphylococcie, tuberculose, herpès, hépatites, amibes, candidose, *etc.*), il est recommandé de mettre en place des protocoles de désinfection des matériels respiratoires, adaptés aux conditions d'intervention.

INTERVENTIONS EN SCAPHANDRE AUTONOME EN CIRCUIT OUVERT

- Lors de l'utilisation du scaphandre autonome en circuit ouvert, la respiration de mélanges « fond » Nitrox doit être si possible privilégiée car elle apporte un gain en termes de sécurité (décompression réduite, meilleur confort de plongée, moins de fatigue…).
- Pour des interventions au-delà de 10 bars de pression absolue (profondeur équivalente de 90 mètres), l'utilisation d'un scaphandre autonome en circuit ouvert n'est pas adaptée. L'utilisation des recycleurs peut être envisagée, mais la plongée avec tourelle doit être cependant privilégiée, notamment pour les travailleurs de la mention A.

INTERVENTIONS EN RECYCLEURS

- Pour les interventions nécessitant de la discrétion, de l'autonomie en gaz, du confort thermique ou une optimisation de la décompression, il est conseillé d'utiliser un recycleur.
- Pour les interventions au-delà de 10 bars de pression absolue (profondeur équivalente de 90 mètres), il est fortement recommandé de privilégier l'utilisation d'une tourelle pour les interventions humaines ou d'un robot télé-opéré depuis la surface (ROV). A défaut, il est recommandé de remplacer le circuit ouvert par un recycleur agréé pour la profondeur maximale d'intervention.
- A pression absolue élevée, en particulier en Offshore, le recycleur peut être conseillé comme moyen de secours pour garantir une autonomie suffisante pour atteindre la tourelle en cas de panne sur l'alimentation en fluides respiratoires.
- Il est fortement recommandé de mettre en place une formation spécifique dispensée par un organisme certifié/agréé comprenant :
  - Une formation initiale sur le type de recycleur (fermé, semi-fermé), pour une utilisation dans un cadre professionnel ;
  - Une formation complémentaire sur l'appareil spécifique mis à disposition par l'employeur et adaptée aux tâches réalisées par le professionnel.
- Il est fortement recommandé de réaliser une formation pour le maintien des acquis dont la fréquence devrait être inférieure à 5 ans.
- Il est fortement recommandé d'anticiper la posture de travail et le type de tâche des personnels avant de choisir le recycleur, afin d'assurer la meilleure ergonomie possible au poste de travail.

- Concernant la mise à disposition de recycleurs au sein d'une entreprise, il est fortement recommandé que l'employeur :
  - Privilégie les appareils personnalisés (1 recycleur personnel pour chaque travailleur) afin de limiter les risques liés à la maintenance et la préparation de l'appareil avant intervention (notamment le remplissage de la chaux sodée) ;
  - *A minima*, le travailleur doit obligatoirement préparer l'appareil qu'il va utiliser en intervention (mise en service et reconditionnement de l'appareil).

- Il est fortement recommandé de respecter rigoureusement les préconisations de fonctionnement, d'entretien et de maintenance définies par le constructeur de l'appareil utilisé.

- Il est fortement recommandé de suivre des mesures de sécurité spécifiques en plongée :
  - Limiter les tâches demandant un effort physique intense ou un outillage trop important pour prévenir le risque d'hypercapnie ;
  - Intervenir systématiquement en binôme, avec le même type d'appareil, de mélange et de procédure de décompression ;
  - Utiliser obligatoirement une sangle d'embout et un couvre-lèvres pour maintenir le système (embout buccal) en bouche en cas de perte de connaissance et prévenir le risque de noyade ;
  - Privilégier la mise en place d'une redondance en circuit-ouvert sur la machine, alimentée avec des mélanges utilisables à la profondeur maximale d'intervention ou à minima, assurer la redondance par un second recycleur.

- Il est fortement recommandé d'avoir une pratique régulière (au moins 2 plongées par mois) pour assurer le maintien des acquis.

- En cas d'arrêt prolongé de la pratique (durée supérieure à un mois), il est recommandé de définir une procédure de reprise d'activité accompagnée et une progressivité de reprise de profondeur.

APNEE

- Compte tenu de la spécificité de l'apnée, il est fortement recommandé de distinguer dans la réglementation, les modalités encadrant la pratique de l'apnée dans un cadre professionnel de celles encadrant les autres méthodes d'intervention mises en œuvre en hyperbarie professionnelle. La définition d'une mention spécifique à la pratique de l'apnée professionnelle associée à des techniques propres et un cursus de formation spécifique pourrait s'avérer pertinente.

- La pratique de l'apnée dans le cadre professionnel pourrait être envisagée sous réserve du respect strict des exigences sécuritaires suivantes :
  - Sur la zone d'intervention autorisée (0 à 20 mètres), il est fortement recommandé de différencier 2 tranches de profondeurs, auxquelles devront correspondre des niveaux de sécurité et de vigilance différents :
    - Tranche 1 : de 0 à 10 mètres
    - Tranche 2 : de 10 à 20 mètres
  - Au-delà de 20 mètres, il est fortement recommandé d'éviter des interventions en apnée sauf exception des enseignants encadrants, de dérogations ou de mesures spécifiques.

- Il est fortement recommandé de pratiquer la plongée en binôme et de visu:
  - Pour des profondeurs supérieures à 10 mètres, le binôme doit obligatoirement être dans l'eau pour assurer une surveillance visuelle permanente.
  - Pour des profondeurs de moins de 10 mètres, l'intervention d'un apnéiste seul peut se discuter, sous réserve de la mise en place d'une procédure spécifique, d'un dispositif d'alerte, d'un moyen de localisation et d'une flottabilité à proximité.
- Il est fortement recommandé d'éviter des durées d'apnées de plus de 90 secondes en particulier pour des profondeurs de plus de 10 mètres.
- Il est fortement recommandé d'adapter la profondeur d'intervention et la durée d'immersion journalière en fonction de la température. La durée maximale recommandée est de 5 heures. Elle est réduite à 3 heures lorsque la température de l'eau est inférieure à 12°C[5].
- Il est fortement recommandé :
  - De ne pas faire d'apnée dans les 12 heures qui suivent une intervention en milieu hyperbare avec paliers de décompressions ;
  - De planifier son intervention en fonction des tâches à effectuer, des caractéristiques du chantier, du matériel disponible et des spécificités environnementales ;
  - De réaliser un échauffement et une progressivité d'immersion ;
  - D'éviter toute hyperventilation prolongée (plus de 4 mouvements amples en 15 secondes) avant une intervention en apnée ;
  - D'éviter les apnées profondes à faible volume pulmonaire ;
  - De maîtriser la manœuvre de la carpe[6] ;
  - De ne pas banaliser les contractions diaphragmatiques sur le fond ;
  - D'éviter les exercices à haute intensité lors de la remontée ;
  - De ne pas banaliser une syncope ou à défaut une samba[7] ;
  - D'avoir des temps de récupération aussi long que les temps d'apnée ;
  - De s'hydrater pour compenser les pertes hydriques d'environ 300 millilitres par heure d'immersion ;
  - D'éviter de prendre de l'aspirine lors des périodes d'intervention en apnée ;
  - De considérer une apnée dans les 12 heures qui précèdent une intervention en milieu hyperbare comme une intervention en scaphandre autonome à part entière (profondeur maximum, durée de travail).

▪ **Recommandations en termes d'actions de recherche et développement**

➢ Assurer le suivi à long terme des travailleurs intervenant aux mélanges, en recycleurs ainsi que des apnéistes professionnels, afin d'acquérir des données complémentaires sur les effets sanitaires potentiels associés.

[5] Le choix des durées s'appuie sur l'appréciation des données scientifiques relatives à la perte de chaleur associée à la diminution de la température de l'eau et sur les retours d'expérience des pratiquants de l'apnée.

[6] Manœuvre glosso-pharyngée qui imite les mouvements de bouches de la carpe dans un objectif de distendre au maximum le thorax afin d'augmenter le volume et la pression intra-pulmonaire.

[7] Accident toxique lié à l'hypoxie et se manifestant par des mouvements incoordonnées et un trouble de la vigilance transitoire.

- Poursuivre le développement et la qualification d'algorithmes de décompression pouvant être adaptés en fonction des paramètres environnementaux des interventions et des caractéristiques individuelles des travailleurs.
- Poursuivre la recherche concernant les systèmes d'analyse et de contrôle en particulier pour les recycleurs (amélioration des cellules oxygène, fiabilité des analyseurs de CO_2…).

Marc Mortureux

MOTS-CLES

Condition hyperbare, exposition professionnelle, mélanges gazeux respiratoires, effets sanitaires, risque santé, recycleur/appareil à recyclage de gaz, apnée.

GLOSSAIRE

Accident biochimique : accident lié à l'augmentation des pressions partielles des gaz respiratoires induisant le dépassement des seuils de toxicité de ces gaz sous l'effet de l'augmentation de la pression absolue lors des interventions en conditions hyperbares.

Accident cardio-vasculaire d'immersion : accident de plongée (en système autonome ou en apnée) multifactoriel consécutif aux contraintes liées à l'immersion. Il s'agit le plus souvent d'un œdème aigu pulmonaire d'immersion, caractérisé par l'apparition de lésions des endothéliums capillaire et alvéolaire sous l'effet de l'immersion et induisant l'irruption du contenu des capillaires pulmonaires dans les alvéoles.

Accident de désaturation : accident lié à la formation anarchique de bulles de gaz dans les tissus de l'organisme causant des lésions tissulaires ou une obstruction vasculaire. Ces accidents sont souvent liés à une vitesse de décompression trop rapide et se manifestent lors de la décompression ou après le séjour sous pression.

Barotraumatisme : lésion causée par les variations de pression et donc de volume des cavités aériques du corps humain (naturelles : sinus, oreille moyenne, poumon, estomac, intestin et/ou pathologiques : carie dentaire, emphysème…). Les accidents barotraumatiques se manifestent lors de la phase de compression ou de décompression.

Hypercapnie : augmentation ou excès de CO_2 dissout dans le sang. Les symptômes de l'hypercapnie sont de gravité croissante avec l'augmentation de la pression partielle de CO_2 (hyperventilation, essoufflement puis perte de connaissance).

Hyperoxie : excès d'apport en O_2 dans l'organisme, susceptible de provoquer des dommages neurologiques voire pulmonaires en cas de durée prolongée.

Hypoxie : chute de la pression partielle d'oxygène dans l'organisme en dessous de 110 à 130 hPa qui, selon la sensibilité individuelle, peut entraîner rapidement une perte de connaissance.

Narcose à l'azote : altération du psychisme dont les manifestations vont de la simple euphorie à la perte de connaissance.

Syncope : perte de connaissance brève.

ANNEXE 1 : SUIVI DES ACTUALISATIONS DE L'AVIS

Date	Version	Page	Description de la modification
08/09/2014	01		Première version signée de l'avis de l'Anses
22/09/2014	02	8	A l'issue des échanges avec la DGT qui se sont tenus au cours de la réunion de restitution du 17 septembre 2014, la formulation de la recommandation suivante a été modifiée : « Il est recommandé que les autorités compétentes *mettent en place des audits spécifiques pour l'hyperbarie professionnelle, afin de vérifier sur le terrain la bonne mise en œuvre de la réglementation* » est ainsi remplacé par « Il est recommandé que les autorités compétentes *organisent le contrôle de la mise en œuvre sur le terrain de l'encadrement adapté à l'utilisation des recycleurs et des mélanges, avec une surveillance prioritaire des mélanges à base d'hélium* ».
		16	Un glossaire définissant les principaux termes médicaux relatifs à l'expertise a été intégré à l'avis.
22/05/2015	03	5	Suite à un commentaire d'un relecteur et une consultation des experts rapporteurs de l'Anses, le terme « - *risques d'effets narcotiques liés à l'hélium pour des profondeurs d'interventions supérieures à 200 mètres : nausées, vertiges, tremblements, hallucinations auditives, modifications de l'EEG…* » a été supprimé du tableau relatif à la synthèse des propriétés spécifiques à la composition de chaque type de mélange. En effet, à de telles profondeurs, les effets de l'hélium ne sont pas encore narcotiques.
		8	Suite à un commentaire d'un relecteur et une consultation des experts rapporteurs de l'Anses, le terme « *mais également en tunneliers profonds* » a été supprimé. En effet, les appareils à recyclage de gaz existants semblent trop encombrants et peser trop lourds pour être utilisés en toute sécurité au cours de ce type d'interventions.



Effets sanitaires liés aux expositions professionnelles à des mélanges gazeux respiratoires autres que l'air dans le cadre des activités hyperbares

Saisine 2013-SA-0030

RAPPORT d'expertise

de septembre 2014

révisé

en mai 2015[1]

[1] annule et remplace le rapport de septembre 2014, voir Annexe 5.

Mots clés

Condition hyperbare, exposition professionnelle, mélanges gazeux respiratoires, effets sanitaires, risque santé, recycleur/appareil à recyclage de gaz, apnée.

Présentation des intervenants

PRÉAMBULE : Les experts externes, membres de comités d'experts spécialisés, de groupes de travail ou désignés rapporteurs sont tous nommés à titre personnel, *intuitu personae,* et ne représentent pas leur organisme d'appartenance.

RAPPORTEURS

M. Mathieu COULANGE – Médecin hospitalier et chercheur au CHU Sainte Marguerite de Marseille /chef de service et médecin expert au centre national de plongée de la Sécurité Civile, compétent en médecine subaquatique et hyperbare, physiologie en environnements extrêmes, expertise en secours nautique et subaquatique.

M. Alain DUVALLET – Médecin, Maître de conférence et praticien hospitalier à l'Université Paris 13 Nord, compétent en médecine subaquatique et hyperbare, physiologie des sports subaquatiques.

M. Jean-Jacques GRENAUD – Capitaine de sapeurs-pompiers professionnels, directeur de l'école nationale de plongée à Gardanne, compétent dans le domaine opérationnel subaquatique, référent national subaquatique pour la sécurité civile.

M. Eric LE MAITRE – Plongeur démineur, ingénieur conseil hyperbare, prestataire pour la direction technique de l'Organisme professionnel de prévention du bâtiment et des travaux publics (OPPBTP), compétences techniques et de terrain, connaissance de l'hyperbarie professionnelle civile, militaire et médicale, connaissances réglementaires.

M. Christophe PENY – Médecin du service de santé des armées, chef de la section santé, expert en plongée et hyperbarie, compétent en médecine subaquatique et hyperbare, physiologie, thérapeutique, prévention, techniques (développement des appareils de plongée), terrain et expertise de la plongée avec recycleurs (sécurité, ergonomie, procédures, normes…).

PARTICIPATION ANSES

Coordination scientifique

Mme Clémence FOURNEAU – Chargée de projets scientifiques dans l'unité d'évaluation des risques liés à l'air – DER – Anses

M. Guillaume BOULANGER – Adjoint au chef de l'unité d'évaluation des risques liés à l'air – DER – Anses

Contribution scientifique

Mme Salma ELREEDY – Adjointe à la directrice des affaires européennes et internationales – DAEI – Anses

Secrétariat administratif

Mme Sophia SADDOKI – DER – Anses

AUDITION DE PERSONNALITES EXTERIEURES

BF Systèmes – Entreprise de services, spécialiste du domaine hyperbare

M. Axel BARBAUD – Ingénieur de l'Ecole Navale, Président de BF Systèmes

M. Julien HUGON – Ingénieur de recherche, Chef du département Modélisation et Analyse

Cephismer - Cellule plongée humaine et intervention sous la mer

M. Jord LUCAS – Commandant de la Cephismer, Porte parole interarmées

CNRS - Centre national de la recherche scientifique / IMBE - Institut Méditerranéen de Biodiversité et d'Ecologie marine et continentale

M. Romain DAVID – Ingénieur d'études à l'IMBE, Chargé de mission SINP (Système d'Information sur la Nature et les Paysages) Mer - façade méditerranéenne

COMEX - Compagnie maritime d'expertise

M. Bernard GARDETTE - Docteur ès Sciences, Directeur scientifique de la COMEX

DRASSM - Département des recherches archéologiques subaquatiques et sous-marines

M. Michel L'HOUR – Archéologue sous-marin, Président du DRASSM

Mme Souen FONTAINE – Archéologue au DRASSM

M. Christian PERON – Chargé de mission au DRASSM

FSGT - Fédération sportive gymnique du travail / Hippoconsulting (Organisme de formation de plongeurs et instructeurs aux Mélanges et Recycleur en France et à l'international)

M. Jean-François ANDRE – Moniteur FSGT, Dirigeant de la société Hippoconsulting

IFREMER - Institut français de recherche pour l'exploitation de la mer (Laboratoire Environnement Ressources Provence-Azur-Corse)

M. Stéphane SARTORETTO – Docteur en écologie marine, Cadre de Recherche à l'IFREMER

INPP - Institut national de la plongée professionnelle

M. Eric ALBIER – Directeur de l'INPP

M. Marc BORGNETTA – Médecin, Chef du service médical de l'INPP

IRD - Institut de recherche pour le développement

M. Régis HOCDE – Ingénieur de recherche, Chargé de mission Infrastructures de recherche et observatoires à l'IRD

Sécurité des travailleurs

Jean-Claude Le Péchon – Ingénieur conseil indépendant - Expertise sécurité travaux hyperbares au sec ou en immersion

OPPBTP - Organisme professionnel de prévention du bâtiment et des travaux publics

M. Eric LE MAITRE – Ingénieur conseil hyperbarie pour la Direction technique de l'OPPBTP

Sécurité civile (sapeurs-pompiers) - Centre National de plongée, Ecole d'application de sécurité civile (ECASC)

M. Jean-Jacques GRENAUD - Officier supérieur de Sapeurs-Pompiers Professionnels, Chef du Centre National de Plongée, Référent National Subaquatique Sécurité Civile

Service de santé des armées (SSA)

M. Michel HUGON – Médecin en chef, Chef du service de médecine hyperbare de l'Hôpital d'Instruction des armées de Sainte-Anne

M. Pascal CONSTANTIN – Médecin en chef, Responsable de l'unité fonctionnelle hyperbarie et plongée de l'Hôpital d'Instruction des Armées du Val-de-Grâce

SNETI - Syndicat national des entrepreneurs de travaux immergés

M. Jean LELIEVRE - Président du SNETI, Représentant l'industrie de la plongée française à l'EDTC (European Diving Technology Committee)

ACTEURS INTERROGES PAR TELEPHONE OU VOIE ELECTRONIQUE

Andromède Océanologie

Florian HOLON – Ingénieur écologue, Co-gérant d'Andromède Océanologie

CAP Plongée - Trébeurden

Olvier BELAUD – Instructeur régional FFESSM, Président de la Commission Technique Régionale Bretagne & Pays de la Loire

CaveXplorer et Bulles Maniacs

Pierre-Eric DESEIGNE – Plongeur spéléologue, Moniteur de plongée souterraine avec utilisation de mélanges et de recycleur

CNPS - Comité National de la Plongée Scientifique

Gérard THOUZEAU - Directeur de recherche CNRS à l'Institut Universitaire Européen de la Mer au Laboratoire des sciences de l'environnement marin, Secrétaire du CNPS

CNRS - Centre national de la recherche scientifique / IMBE - Institut Méditerranéen de Biodiversité et d'Ecologie marine et continentale

Thierry PEREZ - Directeur de recherche CNRS à l'IMBE dans l'équipe « Diversité et Fonctionnement : des molécules aux écosystèmes »

Pierre CHEVALDONNE – Directeur de recherche CNRS à l'IMBE dans l'équipe « Diversité et Fonctionnement : des molécules aux écosystèmes »

CSM Bessac

Yves MENARD – Directeur de l'agence Ile-de-France de CSM Bessac

DAN Europe (Divers Alert Network Europe)

Costantino BALESTRA - Professeur en Physiologie, Directeur du Laboratoire de Physiologie Environnementale et Occupationnelle à la Haute Ecole Paul-Henri Spaak (Pôle Universitaire de Bruxelles Wallonie), Vice-président « Recherche et Education » pour DAN Europe

ESDP - European Scientific Diving Panel

Alain NORRO - Docteur en sciences, Océanographe, Responsable plongée scientifique à l'Institut Royal des Sciences naturelles de Belgique, Instructeur recycleur en circuit fermé

FFESSM - Fédération française d'études et de sports sous-marins

Jean-Louis BLANCHARD - Président de la FFESSM

Joël BRECHAIRE - Moniteur national FFESSM de pêche sous-marine, Président de la commission nationale de pêche sous-marine CIBPL (Comité Bretagne Pays de la Loire)

IANTD France - International Association Nitrox and Technical Divers

Jo GALLIEN - Président d'IANTD France

Manu DUGRENOT - Instructeur IANTD

MULTI SAFETY SUPPORT SYSTEM (M3S)

Nicolas FEBVAY - Plongeur Professionnel, Responsable du département « Activités sous marines et militaires » à M3S

Pêche sous-marine

Richard SABATIE - Enseignant chercheur en sciences halieutiques à l'Agrocampus de Rennes

Plongée en apnée

Morgan BOURC'HIS - Plongeur apnéiste français, Champion du monde d'apnée, Encadrant apnée

Plongée souterraine

Franck VASSEUR – Spéléologue, Instructeur français de plongée souterraine en recycleur

SMPS-CGT - Syndicat des Moniteurs de Plongée Salariés-CGT / Thermodynamique et physico-chimie appliquées à la plongée sous-marine

Pierre LETELLIER - Professeur émérite de thermodynamique à l'Université Pierre et Marie Curie, Laboratoire Interfaces et Systèmes Electrochimiques, CGT- fédération du commerce, Moniteur de plongée sous-marine

SMEL - Station Méditerranéenne de l'environnement littoral

Michel CANTOU - Plongeur biologiste à la SMEL, Instructeur national plongée et pêche en apnée

UCPA - Union Nationale des centres sportifs de plein air

Patricia BRETON-IMBERT - Cadre Technique National à la Direction régionale de la jeunesse, des sports et de la cohésion sociale d'Ile de France, Experte plongée à l'UCPA

SOMMAIRE

Sigles et abréviations

ACoPs : Approved Codes of Practice

ADD : accident de désaturation

AITES (ou ITA) : Association internationale des tunnels et de l'espace souterrain (International tunneling and underground space association)

BOV : Bail-Out Valve (système de secours ou « bail-out » intégré dans l'embout buccal)

BTP : Bâtiment et travaux publics

CAH : Certificat d'aptitude à l'hyperbarie

CCR : recycleurs en circuit fermé

CDD : contrat à durée déterminée

CDI : contrat à durée indéterminée

Cephismer : Cellule plongée humaine et intervention sous la mer

CFR : Code of Federal Regulations

CGT : confédération générale du travail

CHSCT : comité d'hygiène, de sécurité et des conditions de travail

CLIN : comité de lutte contre les infections nosocomiales

CNRS : Centre national de la recherche scientifique

COH : Chef des opérations hyperbares

COMEX : Compagnie maritime d'expertise

CPH : conseiller à la prévention hyperbare

DGT : Direction générale du travail

DOM-TOM : Départements d'Outre-mer – Territoires d'Outre-mer

DP : directeur de plongée

DRASSM : Département des recherches archéologiques subaquatiques et sous-marines

DSAT : Diving Science and Technology

ECASC : Ecole d'Application Sécurité Civile

ECG : électrocardiogramme

EEG : électro-encéphalogramme

EFR : épreuve fonctionnelle respiratoire

EPI : équipement de protection individuelle

ESDC : European Scientific Diving Committee

ETP : équivalent temps plein

FFESSM : fédération française d'études et de sports sous-marins

FSGT : Fédération sportive et gymnique du travail

GPS : groupe de plongées successives

HAS : Haute Autorité de Santé

HSE : Health and safety executive

IANTD : International Association Nitrox and Technical Divers

IFREMER : Institut français de recherche pour l'exploitation de la mer

IMA : International Marinelife Alliance

IMCA : International Marine Contractors Association

INPP : Institut national de la plongée professionnelle

INSU : Institut national des sciences de l'univers

IPH : infirmier plongeur hyperbariste

IRD : Institut de recherche pour le développement

ISP-H : infirmiers sécurité de la plongée, mention hyperbare

ITA (ou AITES)

JSP : journée sécurité plongée

LASEM : laboratoire d'analyses, de surveillance et d'expertise de la Marine

MDD : maladie de la décompression

MN : Marine Nationale

MT : Ministère du Travail

NC : nageurs de combat

NIOSH : National Institute for Occupational Safety and Health

NOAA : National Oceanic and Atmospheric Administration

OAP : œdème aigu pulmonaire

OHB : oxygénothérapie hyperbare

OPPBTP : Organisme professionnel de prévention du bâtiment et des travaux publics

ORL : oto-rhino-laryngologique

OTU : Oxygen Toxicity Unit ou unité de dose toxique d'O_2

P.Abs : pression absolue

P.Relat : pression relative

PCG : plongeurs de combat du génie

PLB : plongeurs de bord

PLD : plongeurs démineurs

PNE : Profondeur Narcotique Equivalente

PpX : pression partielle du gaz X

RAB : Regeln zum Arbeitsschutz auf Baustellen

ROV : remotely operated vehicle ou robots/ véhicules sous-marins télé-opérés

SAL1 : Scaphandriers Autonomes Légers

SAL2 : Scaphandriers Autonomes Légers « Chef d'Unité Plongée »

SAL3 : Scaphandriers Autonomes Légers « Conseillers techniques »

SCR : recycleur en circuit semi-fermé

SCUBA : self contained underwater breathing apparatus" ou scaphandre autonome

SDIS : services départementaux d'incendie et de secours

SMR : Surveillance médicale renforcée

SNETI : Syndicat national des entrepreneurs de travaux immergés

SNHP : syndrome nerveux des hautes pressions

SNL : sous surface non libre

SUVA : Schweizerische Unfallversicherungsanstalt (Caisse nationale suisse d'assurance en cas d'accidents)

TIV : techniciens d'inspection visuelle

V : Volume

VEMP : valeur d'exposition moyenne pondérée

VLEP : valeur limite d'exposition professionnelle

Glossaire

TERMES TECHNIQUES

Aquaticité : capacité de mobilité, fluidité du plongeur dans l'eau.

Bentonite : boue argileuse utilisée lors du creusement de tunnels à l'aide d'un tunnelier à boue bentonitique.

Biberon de secours (ou « pony ») : petit réservoir de gaz de secours.

Bloc (de plongée) : bouteille de plongée.

Câble électro-opto porteur : câble assurant la liaison entre la surface et le ROV et dont le prolongement est appelé « laisse ».

Capacité calorifique (ou thermique) : capacité à emmagasiner de l'énergie. Dans le contexte des interventions en conditions hyperbares, plus la capacité calorifique d'un gaz est élevée, plus l'échange de chaleur entre les poumons et les gaz rafraichis par la détente sera grand.

Exercice de remontée sans embout : exercice de formation des plongeurs consistant à remonter en contrôlant son expiration dans l'objectif de savoir gérer l'air contenu dans les poumons à la remontée (en cas de panne d'alimentation en gaz respiratoires sous l'eau).

Exercice d'assistance avec échange d'embout : exercice de formation des plongeurs consistant à respirer à deux sur un même embout dans l'objectif de préparer le plongeur à assister un camarade en cas de panne d'air.

Gaz neutres (ou inertes) : dans le contexte des interventions en conditions hyperbares, il s'agit des gaz utilisés en tant que diluant de l'oxygène (O_2) pour la fabrication de mélanges gazeux respiratoires ; l'Azote (N_2) et l'Hélium (He) sont les plus courants. Ces gaz présentent l'avantage d'être stables chimiquement au sein du mélange, mais également inertes sur le plan biochimique, ce qui signifie qu'ils ne sont pas métabolisés par l'organisme humain. Ces gaz peuvent néanmoins diffuser et se dissoudre dans l'organisme et ainsi provoquer des modifications physiologiques sous l'effet des variations de pression.

Ligne à paliers (fixe ou dérivante) : dispositif immergeable, relié à la surface et permettant au scaphandrier d'identifier sous l'eau la profondeur à laquelle il doit effectuer ses paliers de décompression.

Ludion : une plongée ludion est historiquement une plongée au cours de laquelle le plongeur réalise à partir d'un niveau de profondeur donné, des excursions plus ou moins longues à une profondeur supérieure, en revenant rapidement à la profondeur de base, sans palier de décompression. Néanmoins, dans le langage courant, la définition de cette technique de plongée est aujourd'hui assimilée à celle de la plongée yoyo. Dans le cadre de ce rapport, le terme « ludion » sera employé en tant que synonyme de « yoyo ».

Mélange (ou gaz) « fond » : mélange (ou gaz) respirable jusqu'à la profondeur maximale d'une intervention.

Mélange (ou gaz) de « décompression » : mélange (ou gaz) utilisé uniquement au cours de la décompression, suivant des zones de pressions déterminées.

OTU (Oxygen Toxicity Unit) : 1 OTU est assimilé à 1 UPTD.

Paliers de décompression : il s'agit du temps passé à une pression donnée prédéterminée, au cours de la phase de décompression, assurant une désaturation efficace des tissus de l'organisme.

Plongée carrée : descente sur le fond pour une durée et une profondeur données, en modifiant très peu la profondeur.

Plongée en mode successif (ou plongées successives) : 2 plongées effectuées dans un intervalle de temps rapproché (compris entre 15 min et 12 heures).

Plongée engagée : plongée nécessitant un engagement technique et physique plus important que les plongées classiques (utilisation de mélanges, recycleurs...).

Plongée isolée : toute plongée effectuée au minimum 12 heures après la précédente.

Plongée yoyo : une plongée yoyo est une plongée au cours de laquelle le plongeur réalise une succession de montées et de descentes (plongée avec descentes et remontées multiples). Le terme de plongée ludion est aujourd'hui assimilé à la plongée yoyo.

ROV (véhicule sous-marin téléguidé) : Il s'agit d'un petit sous-marin filoguidé et contrôlé à distance.

Sac inspiratoire (ou faux-poumon) : réserve de gaz « frais » pour l'utilisateur.

Solénoïde : électrovanne constitutive des recycleurs, permettant l'injection de gaz (O_2) dans le sac inspiratoire en remplacement des gaz consommés.

Tables MN90 : tables de décompression conçues et publiées par la Marine Nationale en 1990. Elles sont destinées spécifiquement au personnel de la Marine.

Tables MT : tables de désaturation conçues par la COMEX, publiées par le Ministère du Travail en 1992 et actualisées par l'annexe de l'Arrêté du 30 Octobre 2012 (JO N° 290 du 13 décembre 2012. BO n°2012-12 du 30 décembre 2012).

Tubistes : hyperbaristes au sec, intervenant en air comprimé notamment dans le creusement des tunnels.

UPTD (Unit Pulmonary Toxic Dose) : 1 UPTD correspond à l'effet pulmonaire théorique d'une pression partielle de 1 bar d'oxygène pur inspirée pendant 1 minute.

Voussoirs : éléments préfabriqués constituant la paroi d'un tunnel.

TERMES MEDICAUX

Accident biochimique : accident lié à l'augmentation des pressions partielles des gaz respiratoires induisant le dépassement des seuils de toxicité de ces gaz sous l'effet de l'augmentation de la pression absolue lors des interventions en conditions hyperbares.

Accident cardio-vasculaire d'immersion : accident de plongée (en système autonome ou en apnée) multifactoriel consécutif aux contraintes liées à l'immersion. Il s'agit le plus souvent d'un œdème aigu pulmonaire d'immersion, caractérisé par l'apparition de lésions des endothéliums capillaire et alvéolaire sous l'effet de l'immersion et induisant l'irruption du contenu des capillaires pulmonaires dans les alvéoles.

Accident de désaturation : accident lié à la formation anarchique de bulles de gaz dans les tissus de l'organisme causant des lésions tissulaires ou une obstruction vasculaire. Ces accidents sont souvent liés à une vitesse de décompression trop rapide et se manifestent lors de la décompression ou après le séjour sous pression.

Acouphènes : perception auditive (battements, grésillements, sifflements) en l'absence de tout stimulus externe.

Aéroembolisme systémique : présence de bulles de gaz, généralement de l'azote, à l'intérieur des vaisseaux sanguins et des tissus de l'organisme.

Angle de His : angle aigu formé par le rattachement de l'œsophage avec le bord gauche de l'estomac.

Asthénie : altération de l'état général se manifestant par une faiblesse généralisée de l'organisme.

Barotraumatisme : lésion causée par les variations de pression et donc de volume des cavités aériques du corps humain (naturelles : sinus, oreille moyenne, poumon, estomac, intestin et/ou pathologiques : carie dentaire, emphysème…). Les accidents barotraumatiques se manifestent lors de la phase de compression ou de décompression.

Capacité vitale : quantité maximale d'air pouvant être inspirée et rejetée par les poumons lors d'une inspiration et d'une expiration forcées.

Capnie : pression partielle en dioxyde de carbone.

Carpe (manœuvre de) : manœuvre glosso-pharyngée qui imite les mouvements de bouches de la carpe dans un objectif de distendre au maximum le thorax afin d'augmenter le volume et la pression intra-pulmonaire.

Cavités aériques : cavités ou organes contenant naturellement des gaz (poumons, oreilles, sinus…).

Centre pneumoïque : barycentre des volumes pulmonaires. Il s'agit d'un point virtuel pouvant être assimilé au centre des poumons. En recycleur, le confort respiratoire dépend de la position des sacs respiratoires (faux-poumons) par rapport au centre pneumoïque.

Compliance parenchymateuse pulmonaire : capacité des tissus pulmonaires à modifier le volume du poumon en réponse à une variation de pression.

Crise hypoxique : manque d'O_2 dans les tissus de l'organisme.

Dysperméabilité tubaire : fermeture anormale de la trompe d'Eustache.

Dyspnée : difficulté respiratoire.

Emboliser : provoquer l'embolie c'est-à-dire l'obstruction d'un vaisseau sanguin.

Emphysème pulmonaire : pathologie caractérisée par la destruction progressive du tissu pulmonaire.

Epistaxis : hémorragie ou saignement nasal.

Espace mort : il s'agit du volume de gaz respiratoires qui au moment de la ventilation, n'atteint pas les alvéoles (siège des échanges gazeux).

Fistule cérébro-méningée : communication d'origine pathologique entre une artère cérébrale et le liquide céphalo-rachidien.

Fruste : des symptômes dits « frustes » sont des signes cliniques discrets ou légers.

Hypercapnie : augmentation ou excès de CO_2 dissout dans le sang. L'hypercapnie est définie à partir d'une $PpCO_2$ supérieure à 45 mmHg. Les symptômes de l'hypercapnie sont de gravité croissante avec l'augmentation de la pression partielle de CO_2 (hyperventilation, essoufflement puis perte de connaissance).

Hyperoxie : excès d'apport en O_2, susceptible de provoquer des dommages irréversibles sur l'organisme en cas de durée prolongée.

Hyperpneumatisation : formation excessive de cavités remplies de gaz dans un tissu.

Hypoacousie (ou surdité) : terme générique désignant la diminution de l'acuité auditive.

Hypoxie : chute de la pression partielle d'oxygène dans l'organisme en dessous de 110 à 130 hPa qui, selon la sensibilité individuelle, peut entraîner rapidement une perte de connaissance.

Infarcissement : formation d'un infarctus (nécrose irréversible) dans un organe causée par un manque d'O_2.

Kyste pulpaire : lésion kystique située au niveau de la pulpe de la dent.

Laryngocèle : hernie du larynx.

Narcose à l'azote : altération du psychisme dont les manifestations vont de la simple euphorie à la perte de connaissance.

Neutralité thermique (immersion à 34°C) : il s'agit de l'intervalle de température pour lequel l'organisme n'a ni chaud, ni froid sans mise en jeu des systèmes de régulation.

Odontalgie : douleur des dents.

Œdème palpébral : accumulation de liquide au niveau des tissus de la paupière, entrainant un gonflement de cette dernière.

Otalgie : douleur de l'oreille.

Pathologie intercurrente : affection survenant au cours d'une autre maladie.

Plexus veineux épiduraux : veines du rachis (colonne vertébrale).

Pneumencéphalie : appelé aussi pneumocéphale ou pneumocéphalie, correspond à la présence de gaz dans ou autour de l'encéphale suite à une brèche ostéo-méningée.

Pneumopéritoine : entrée de gaz dans la cavité de l'abdomen (péritoine).

Samba : accident toxique lié à l'hypoxie et se manifestant par des mouvements incoordonnés et un trouble de la vigilance transitoire.

Scotomes scintillants : tâche brillante se déplaçant, de forme variée perçue dans le champ visuel. Elle est due à l'absence de perception dans une zone de la rétine.

Shunt intrapulmonaire : suite à une mauvaise ventilation alvéolaire, une partie du sang veineux traverse les poumons sans être oxygénés, entrainant une diminution globale de la teneur en O_2 du sang artériel.

Stades otoscopiques : stades cliniques d'atteinte du tympan et du conduit auditif externe.

Syncope : perte de connaissance brève.

Taravana syndrome : accident de désaturation de l'apnéiste.

Toux hémoptoïque : toux expectorante accompagnée de filets de sang.

Valsalva (manœuvre de) : manœuvre d'équilibrage permettant d'équilibrer la pression entre l'oreille externe et l'oreille moyenne.

Vertige alternobarique : vertige passager dû à un syndrome vestibulaire de type irritatif.

Volume expiratoire de réserve : quantité d'air qu'il est encore possible d'expulser par une expiration forcée après une expiration normale.

Liste des tableaux

Liste des figures

1 Contexte, objet et modalités de traitement de la saisine

1.1 Contexte

L'ancienne réglementation relative aux travailleurs intervenant en milieu hyperbare était issue du décret n° 90-277 du 28 mars 1990 et de ses arrêtés d'application, notamment l'arrêté du 15 mai 1992 définissant les procédures d'accès, de séjour, de sortie et d'organisation du travail en milieu hyperbare.

Cette réglementation, très marquée par les activités de travaux subaquatiques, était devenue difficilement applicable pour certains autres secteurs d'activités, notamment les milieux scientifiques et techniques. Un nouveau décret a donc été publié le 11 janvier 2011 (décret n°2011-45).

Ce décret vise non seulement à améliorer la sécurité des travailleurs intervenant en milieu hyperbare mais également à créer un socle réglementaire commun qui harmonise, autant que possible, les règles techniques applicables aux différentes activités hyperbares afin notamment d'en accroître la lisibilité. Des arrêtés, pris pour chacun des secteurs d'activités concernés, sont en cours de rédaction et précisent les dispositions particulières qui leur sont propres.

Cette nouvelle réglementation comporte des avancées en matière de prévention des risques professionnels, néanmoins, elle ne prévoit pas de dispositions particulières pour la mise en œuvre des techniques nouvelles (la plongée utilisant les recycleurs) ou non couvertes par les dispositions réglementaires précédentes (l'apnée).

Pour assurer la construction du cadre réglementaire adapté à l'exercice de l'ensemble de ces pratiques, la Direction générale du travail (DGT) a saisi l'Anses afin de solliciter une expertise concernant les effets sanitaires liés aux expositions professionnelles à des mélanges gazeux respiratoires autres que l'air dans le cadre des activités hyperbares.

1.2 Objet de la saisine

Dans un contexte d'extension de la réglementation à de nouveaux champs, permettant de garantir la pratique de l'ensemble des activités professionnelles hyperbares en toute sécurité, il est demandé à l'Anses d'apporter des éléments concernant les points suivants :

- Identifier et caractériser les populations concernées par le travail en conditions hyperbares, tous secteurs confondus (activités exercées, effectifs, classes d'âges…) ainsi que les conditions d'utilisation des matériels et mélanges gazeux respiratoires autres que l'air (types de matériels utilisés, mélanges gazeux utilisés, durée et fréquence d'utilisation…).
- Définir les effets sanitaires (à court et long terme) sur l'organisme liés à l'usage des matériels et mélanges gazeux identifiés. Une attente plus particulière concerne l'utilisation des appareils à recyclage de gaz, les « recycleurs », pour lesquels un complément d'information sur les pratiques et usages à l'étranger ainsi que l'accidentologie au niveau international pourra être réalisé.
- En complément, un focus est demandé sur la pratique de l'apnée dans le cadre d'activités professionnelles (scientifiques, archéologie, pêche…) afin d'évaluer l'accidentologie liée à cette pratique, les conséquences physiologiques et le cas échéant, d'émettre les recommandations pertinentes associées.

1.3 Modalités de traitement : moyens mis en œuvre et organisation

L'instruction de cette saisine a été réalisée par l'unité d'évaluation des risques liés à l'air, avec l'appui de 5 experts rapporteurs externes nommés *intuitu personae* spécifiquement dans le cadre de ces travaux. Leurs domaines de compétences sont les suivants : toxicologie, physiologie, connaissance des activités professionnelles en milieu hyperbare, connaissances des usages et des procédés de contrôle des matériels et mélanges gazeux respiratoires utilisés, médecine hyperbare, *etc.*

La collecte des informations nécessaires à la réalisation de cette expertise a consisté pour partie, en la réalisation d'une recherche bibliographique (revues à comité de lecture, ouvrages de référence ou littérature grise), complétée par l'interrogation des acteurs français et internationaux du domaine de l'hyperbarie professionnelle.

L'analyse des effets sanitaires et de l'accidentologie liés à la pratique d'une activité professionnelle en conditions hyperbares s'appuie d'une part sur la consultation d'ouvrages ou d'articles de référence généraux, et d'autre part sur une revue de la littérature centrée sur les mélanges gazeux autres que l'air ainsi que les recycleurs et l'apnée. Les mots clés retenus pour cette recherche concernaient la population exposée, les conditions d'exposition et les effets sanitaires. Les bases de données Scopus et Pubmed ont été explorées selon plusieurs requêtes croisées afin d'avoir une vision exhaustive et large des publications couvrant la thématique. Au total, 353 références ont été identifiées avec ces requêtes larges parmi lesquelles 58 ont été retenues pour une analyse approfondie.

Les données relatives aux profils de population et aux pratiques propres à chaque filière proviennent essentiellement des entretiens réalisés auprès des professionnels des domaines d'activité concernés. Les acteurs pertinents identifiés ont été interrogés sous forme d'enquêtes (échange téléphonique ou par courrier électronique) ou d'auditions (entretiens de visu), sur la base d'un questionnaire élaboré conjointement par les rapporteurs et l'Anses afin de répondre aux questions posées par la saisine. Le contenu de ce dernier visait ainsi à décrire les populations professionnelles concernées par le travail en conditions hyperbares (incluant la pratique de l'apnée), les matériels et mélanges gazeux respiratoires utilisés et à préciser les effets sanitaires sur l'organisme associés. Le questionnaire ainsi que les comptes rendus des enquêtes/auditions sont disponibles respectivement en Annexes 2 et 3. La liste de l'ensemble des acteurs interrogés est donnée ci-dessous.

<u>Acteurs auditionnés :</u>

BF Systèmes – Entreprise de services, spécialiste du domaine hyperbare - solutions et services dédiés à la sécurité de la plongée (accidentologie internationale, étude cardio/doppler, modélisation) - le 18 novembre 2013 ;

Cephismer - Cellule plongée humaine et intervention sous la mer - Population défense - Expertise recycleur - Médecine hyperbare – Formation - le 18 novembre 2013 ;

CNRS - Centre national de la recherche scientifique / IMBE - Institut Méditerranéen de Biodiversité et d'Ecologie marine et continentale – Plongée scientifique - pratique professionnelle, formation - le 27 novembre 2013 ;

COMEX - Compagnie maritime d'expertise - Expérience de la plongée professionnelle aux mélanges (ingénierie hyperbare, centre d'essais hyperbares et plongée humaine profonde) - le 27 novembre 2013 ;

DRASSM - Département des recherches archéologiques subaquatiques et sous-marines - Plongée scientifique/Archéologie sous-marine et subaquatique - le 28 novembre 2013 ;

FSGT - Fédération sportive gymnique du travail / Hippoconsulting – Organisme de formation de plongeurs et instructeurs aux mélanges et recycleurs en France et à l'international - Recycleurs, plongée aux mélanges - le 27 novembre 2013 ;

IFREMER - Institut français de recherche pour l'exploitation de la mer (Laboratoire Environnement Ressources Provence-Azur-Corse) - Population des plongeurs scientifique/pêche - Connaissance des pratiques professionnelles de l'apnée secteur de la pêche (palourdes, naissain de moules dans l'étang de Thau) - le 28 novembre 2013 ;

INPP - Institut national de la plongée professionnelle - formation des plongeurs professionnels (développement des activités liées à la plongée professionnelle, à la sécurité et à l'intervention en milieu aquatique et hyperbare) - le 28 novembre 2013 ;

IRD - Institut de recherche pour le développement - Plongée scientifique – Recycleurs, le 28 novembre 2013 ;

Jean-Claude Le Péchon - Ingénieur conseil - Expertise sécurité mentions A, B, C et D - les 29 novembre et 19 décembre 2013 ;

OPPBTP - Organisme professionnel de prévention du bâtiment et des travaux publics - prévention, sécurité, santé - le 25 novembre 2013 ;

Sécurité civile (sapeurs-pompiers) - Centre National de plongée, Ecole d'application de sécurité civile (ECASC) - mentions B, accidentologie - le 27 novembre 2013 ;

Service de santé des armées - Médecine hyperbare et expertise plongée, population défense - le 18 novembre 2013 (Hôpital d'Instruction des armées Sainte-Anne à Toulon) et le 29 novembre 2013 (Hôpital d'Instruction des armées du Val-de-Grâce à Paris) ;

SNETI - Syndicat national des entrepreneurs de travaux immergés - Population des mentions A et D, activités et méthodes d'intervention (regroupe les sociétés françaises spécialisées et qualifiées dans la réalisation de travaux en hyperbarie) - le 28 novembre 2013 ;

Acteurs interrogés par téléphone ou voie électronique :

Andromède Océanologie – Bureau d'études – Secteur scientifique/cinématographique – expérience de la plongée naturaliste profonde en recycleurs ;

CAP Plongée - Centre d'activités plongée de Trébeurden - Recycleurs - Secteur formation sportive ;

CaveXplorer et Bulles Maniacs – Plongée souterraine – Formation et explorations aux mélanges et en recycleurs ;

CNPS - Comité National de la Plongée Scientifique – Recensement des plongeurs scientifiques professionnels – Promotion des actions de formation – Réglementation de la plongée scientifique ;

CNRS - Centre national de la recherche scientifique / IMBE - Institut Méditerranéen de Biodiversité et d'Ecologie marine et continentale – Plongée scientifique - pratique professionnelle, formation ;

CSM Bessac : Tunnels / microtunnels - Réalisation des travaux - Ingénierie - Bureau d'études - Fabrication de matériels (fabricant de tunneliers) – Maintenance ;

DAN Europe - Divers Alert Network Europe - Organisation médicale et de recherche internationale dédiée à la sécurité et à la santé des plongeurs sportifs et de loisir ;

ESDP - European Scientific Diving Panel - secteur de la plongée scientifique ;

FFESSM - Fédération française d'études et de sports sous-marins plongeurs professionnels, sportifs, formation apnée, recycleur ;

Franck VASSEUR – Spéléologue, instructeur français de plongée souterraine en recycleur ;

IANTD France - International Association Nitrox and Technical Divers - Organisme de formation à la plongée technique ;

INSU - Institut national des sciences de l'univers – Plongée scientifique ;

Morgan BOURC'HIS - Champion du monde d'apnée et encadrant apnée - Apnée sportive et expertise apnée appliquée au milieu professionnel ;

MULTI SAFETY SUPPORT SYSTEM, maison des technologies c/o TVT - Fabricant de recycleurs ;

Pierre LETELLIER - Professeur émérite de thermodynamique à l'Université Pierre et Marie Curie, Laboratoire Interfaces et Systèmes Electrochimiques ;

Richard SABATIE - Enseignant chercheur en sciences halieutiques à l'Agrocampus de Rennes – Pêche sous-marine professionnelle ;

SMPS-CGT - Syndicat des Moniteurs de Plongée Salariés-CGT (affilié à la fédération CGT du Commerce) ;

SMEL - Station Méditerranéenne de l'environnement littoral - Secteur scientifique - Ecologie marine (réseaux trophiques, microbiologie) et biologie des populations marines (génétique, parasitologie, écophysiologie) ;

UCPA - Union Nationale des centres sportifs de plein air – Encadrement professionnel de la plongée loisir.

Une analyse de la littérature grise (documents gouvernementaux, études non publiées, résumés pour les congrès, rapports et autres documents non conventionnels…) *via* la consultation d'Internet a également permis de compléter ce recueil d'informations, notamment au sujet des généralités concernant les gaz respiratoires et les équipements utilisés en milieu hyperbare.

Une consultation internationale (Europe et Amérique du Nord) des agences ou autorités nationales dans les domaines de la sécurité sanitaire et/ou du travail a été initiée au mois d'octobre 2013 par voie électronique. Cette enquête a permis de préciser principalement le cadre législatif relatif aux activités professionnelles en conditions hyperbares mais a également apporté des informations sur l'encadrement législatif des recycleurs, la pratique de l'apnée professionnelle, l'utilisation des mélanges gazeux et leur contamination.

L'expertise a été réalisée dans le respect de la norme NF X 50-110 « Qualité en expertise – prescriptions générales de compétence pour une expertise (Mai 2003) ».

1.4 Prévention des risques de conflits d'intérêts.

L'Anses analyse les liens d'intérêts déclarés par les experts avant leur nomination et tout au long des travaux, afin d'éviter les risques de conflits d'intérêts au regard des points traités dans le cadre de l'expertise.

Les déclarations d'intérêts des experts sont rendues publiques *via* le site internet de l'Anses (www.anses.fr).

1.5 Champ de l'expertise

La délimitation du champ de l'expertise a été orientée selon les attentes de la DGT au regard de l'évolution actuelle des textes réglementaires. Les interrogations du Ministère concernaient en priorité les effets sanitaires liés à l'utilisation professionnelle de systèmes de plongée à circuit-ouvert avec des mélanges gazeux respiratoires autres que l'air, l'utilisation des recycleurs et la pratique de l'apnée.

Les questions relatives aux plongées profondes à saturation plus anecdotiques et très encadrées, ne sont donc pas traitées dans le cadre de cette expertise, même si elles impliquent la respiration de mélanges gazeux autres que l'air.

2 Le travail en conditions hyperbares

2.1 Historique

2.1.1 Hyperbarie en milieu aquatique

Depuis l'Antiquité, de nombreuses expériences ont accompagné le développement de l'exploration sous-marine, au début en apnée, puis ensuite avec divers équipements (outres et sacs gonflés d'air, cloches diverses, cagoules reliées à la surface et autres tonneaux, scaphandres et masques…).

Si le développement progressif d'appareils de plongée tels que les tubas, les cloches de plongée ou les scaphandres ont permis d'accroître l'autonomie de l'Homme sous l'eau, la plongée autonome moderne est née avec l'apparition du détendeur en 1865 (Rouquayrol et Denayrouze) qui permet une distribution au plongeur d'un mélange gazeux à une pression égale à celle du milieu environnant ; suivie en 1908, par la publication des premières tables de décompression (Haldane). Les appareils en circuit fermé et semi-fermé (les recycleurs) ont par ailleurs été mis au point avant les appareils en circuit ouvert.

A ses débuts, la plongée française a été essentiellement une activité développée par des militaires et des industriels, notamment dans les périodes avant et après guerre. Dans le même temps, quelques pionniers pratiquaient également la chasse sous-marine en apnée (le premier club ayant été créé au milieu des années 1930) et parfois la plongée en scaphandre (poissons, coquillages, amphores, vestiges d'épaves…).

Dans les années 1950, la plongée sportive de loisir a commencé à se développer, essentiellement dans un cadre associatif, avec notamment la création de la Fédération française d'études et de sports sous-marins (FFESSM) en 1948. En 1955, une autre fédération, la Fédération sportive et gymnique du travail (FSGT) propose également des activités de plongée.

Dans les années 1960 à 1970, l'offre a commencé à se diversifier avec l'émergence d'un secteur professionnel dans le domaine de la plongée subaquatique de loisir. Parallèlement, des plongées à saturation réalisées par la Marine Nationale et la COMEX en utilisant des mélanges gazeux respiratoires (Trimix notamment) atteignirent des profondeurs de 300 puis 500 mètres. Les premières plongées profondes en circuit ouvert aux mélanges Héliox ont été réalisées par Cousteau dès 1964, à l'aide d'une tourelle Galeazzi (cylindre en acier monoplace dont la structure permet d'atteindre des fortes profondeurs suivant les modèles). Dès 1970, les plongées à l'Héliox en scaphandre autonome se pratiquent dans l'offshore jusqu'à des profondeurs de 70 mètres, puis en utilisant un mélange ternaire à partir de 1973.

Depuis le début des années 1990, la plongée française loisira vu émerger différentes pratiques nouvelles : La plongée « technique », en partie issue des pratiques militaires ou industrielles et nécessitant l'usage d'un matériel spécifique (recycleur par exemple) et/ou d'un mélange respirable particulier (Nitrox, Nitrhéliox…)) ; d'autres pratiquestrès axées sur des concepts de balade, d'environnement, d'écologie et d'économie durable se développent également (randonnée subaquatique, en apnée par exemple) ainsi que quelques activités très confidentielles (par exemple, la plongée spéléo). Ces pratiques sont susceptibles d'influencer les pratiques professionnelles.

2.1.2 Hyperbarie en milieu sec

Caissons hyperbares thérapeutiques et de recompression

En 1878, Paul Bert publie l'ouvrage « La pression barométrique », où il pressentait les effets bénéfiques de l'oxygène respiré sous 60% à 1 ATA, mais insistait surtout sur sa toxicité à haute pression. L'idée d'une application thérapeutique d'un séjour en pression, revient au Docteur Henshaw de Londres, qui en 1662, faisait respirer de l'air comprimé à ses patients à l'intérieur d'une chambre appelée « domicilium ».

Dans l'entre-deux-guerres existaient déjà des caissons monoplaces de recompression, qui progressivement laissèrent la place à des caissons multiplaces, tandis que les médecins militaires des Marines, puis ceux des entreprises de plongeurs professionnels, mettaient au point, en France et à l'étranger, des profils thérapeutiques hyperbares adaptés à la gravité des symptômes et établissaient des procédures de plongée visant à prévenir les accidents de décompression.

A partir des années 1960, avec le développement de la plongée profonde en France, liée aux activités d'exploration pétrolières « offshore » et militaires ; des médecins spécialisés en hyperbarie associés avec la COMEX ont contribué à l'élaboration des procédures d'intervention et thérapeutiques par des expérimentations en centre hyperbare et à la mer ; en 1977, l'opération JANUS IV est réalisée à 501 mètres de profondeur avec un mélange héliox par la COMEX et la Marine Nationale.

Aujourd'hui, la médecine hyperbare est reconnue dans le traitement de certains accidents de plongée, mais également pour d'autres appplications, par exemple en vue de faciliter la cicatrisation des plaies chez les patients diabètiques notamment.

Travaux de creusement des puits et tunnels

Le travail hyperbare au sec remonte à l'utilisation des cloches à plongeur permettant aux ouvriers de travailler en milieu aquatique, à l'intérieur d'une cloche remplie d'air reliée par câble, à un bateau. Ce système possédait néanmoins de gros défauts : l'autonomie d'air était assez limitée, les travaux étaient uniquement réservés aux fonds aquatiques et il fallait systématiquement remonter la cloche pour sortir les déblais.

Parmi les appareils actuellement utilisés pour permettre le creusement de tunnels se trouve le tunnelier à pression d'air. Le principe de la machine est d'appliquer une pression d'air dans la chambre d'abattage pour assurer la stabilité du front pendant le creusement. Ces tunneliers pressurisés peuvent être utilisés sous des nappes phréatiques, afin de compenser la pression exercée par l'eau sur les parois de la machine.

Le premier à avoir eu l'idée d'utiliser l'air comprimé pour creuser dans les terrains aquifères est Thomas Cochrane, un ingénieur anglais qui déposa un brevet en 1830 sous le titre : « *Appareil pour faciliter l'excavation, le creusement et l'exploitation minière* ». Il s'agit néanmoins d'un engin purement théorique qui ne fut jamais construit.

Triger mit au point en 1839, une technique innovante de percement à la verticale consistant à enfoncer dans le sol un tube métallique sur lequel vient se fixer un « sas à air » empêchant toute communication entre l'air atmosphérique et le fond du puits et équipé de 2 trappes étanches permettant l'accès des ouvriers et l'évacuation des déblais ; c'est le concept du « sas de tunnelier ».

Les années 1850 marquent l'apparition des premières machines produisant et utilisant l'air comprimé. En 1864 James Henry Greathead démarre le creusement d'un tunnel à l'aide d'un tunnelier dit « à bouclier ». Il s'agit d'un procédé de creusement consistant à faire avancer une structure cylindrique en acier suivant l'axe défini du tunnel tout en forant le sol. Lors des opérations de creusement, le front de taille peut être stabilisé par différents moyens (mécanique, air comprimé, boue…) et c'est en 1873 que pour la première fois, de l'air comprimé est utilisé pour empêcher l'eau de la nappe phréatique de pénétrer dans un tunnel en construction. Ce fut sous l'Hudson River, à New-York, pour la construction d'un tunnel ferroviaire.

A partir de 1987, le projet de tunnel sous la Manche a donné un élan important aux travaux souterrains réalisés au tunnelier en Europe. La récession de 1993 à 1995 a resteint le marché des constructeurs de machines qui est passé de 24 fournisseurs mondiaux en 1989 à 12 en 1993. Depuis le début des années 1990, le marché est tourné principalement vers la Chine qui s'équipe massivement en réseaux ferrés souterrains. En France, les travaux de construction du « Grand Paris » vont nécessiter la mise en œuvre de plusieurs tunneliers.

2.2 Définition du « milieu hyperbare »

2.2.1 Les pressions : définitions, lois physiques et concepts fondamentaux

2.2.1.1 Définitions

Pression

On considère une force F, qui s'exerce perpendiculairement à une surface d'aire A, (figure 1).

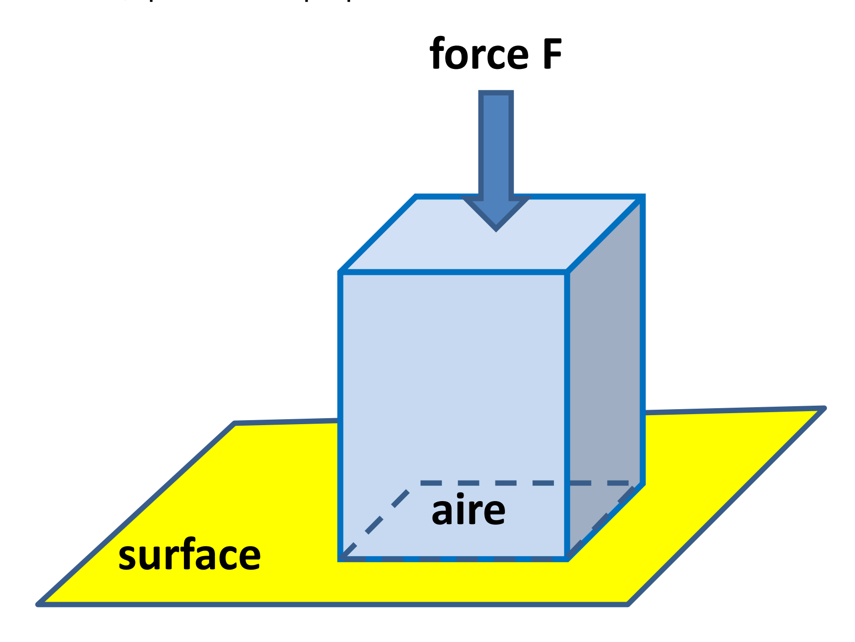


Figure 1 : La force est perpendiculaire à la surface et agit sur l'aire A. La surface est une entité géométrique, l'aire en est sa mesure.

Tous les points de la surface d'aire A, sont soumis à une pression égale au rapport entre la force et l'aire.

$$P = \frac{F}{A}$$

La valeur de la pression s'exprime dans le système international en $N.m^{-2}$ (newton par m^2). Par convention, cette unité est le *pascal* (Pa). Afin de ne pas avoir à employer des nombres trop grands pour exprimer les valeurs des pressions dans les conditions de la vie courante, on utilise généralement comme unité, un multiple du pascal, le *bar* qui est égal à 10^5 pascals (100 000 pascals).

D'autres unités conventionnelles sont utilisées pour exprimer les pressions, en particulier dans les documents traitant des interventions hyperbares :

- L'*atmosphère technique, ATA* : un ATA est une pression égale à 0,981 bar ;
- L'*atmosphère*, atm : un atm est une pression égale à 1,013 bar ;
- Le *torr*, mm de mercure : 1 atmosphère est égale à 760 Torrs.

Comme on peut le remarquer, l'ATA et l'atmosphère sont des grandeurs dont les valeurs exprimées en bar sont voisines de l'unité. Pour les calculs approchés, il est donc admis que 1 bar ≈1 ATA ≈ 1 atmosphère.

Pression exercée sur l'organisme du travailleur en conditions hyperbares

A la pression atmosphérique (P_{atm}) le travailleur, au niveau de la mer, subit une pression proche de 1 bar. Dans le cadre de ses interventions hyperbares, il sera soumis à une pression supérieure, que l'on conviendra de nommer pression absolue (P_{abs}). Par convention la différence entre la pression absolue et la pression atmosphérique, est la pression relative (P_{rel}).

$$P_{rel} = P_{abs} - P_{atm}$$

Lorsque le travailleur est un plongeur, la pression relative dépend de la profondeur à laquelle il intervient. La pression relative s'identifie alors à la pression hydrostatique, (P_{Hydro}). Dans un fluide homogène en équilibre, la différence de pression (ΔP) entre deux points séparés par une différence d'altitude, h, s'écrit :

$$\Delta P = \rho\ g\ h$$

ρ est la masse volumique du fluide, exprimée en $kg.m^{-3}$ (kilogramme par mètre cube), h s'exprime en mètre, et g est l'accélération de la pesanteur en $m.s^{-2}$ (mètre par seconde au carré). Sa valeur « normale » est de 9,806 65 $m.s^{-2}$. La valeur approchée 9,81 $m.s^{-2}$ sera utilisée pour les calculs.

Dans ces conditions, la variation de pression s'exprime en pascals. Pour une dénivellation de 10 m, dans une eau de masse volumique égale à 1000 $kg.m^{-3}$, (1 $kg.dm^{-3}$), la variation de pression est égale à 98100 pascals, soit 0,981 bar. C'est ainsi qu'est défini l'ATA.

Remarque 1 : la valeur de la pression due au fluide ne dépend que des niveaux relatifs des points considérés dans le milieu et pas de leur positionnement. Il existe la même différence de pression entre le point B de la figure 2 et tous les points A.

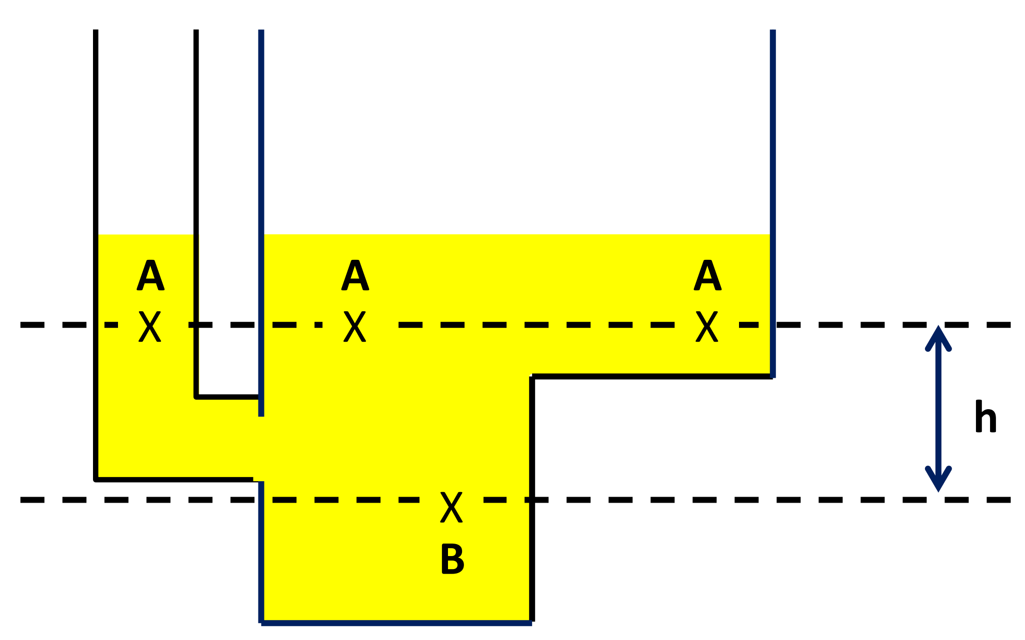


Figure 2 : La différence de pression entre 2 points d'un fluide ne dépend que de leur différence d'altitude, h.

Remarque 2 : au niveau de la mer, la plupart des instruments de mesure de pression affichent zéro alors que la pression ambiante est de 1 bar, ils mesurent alors la pression relative, (P_{relat}).

Remarque 3 : dans une eau de mer de salinité 35 g.L^{-1} (gramme par litre), de masse volumique 1,026 kg.dm^{-3}, à 15°C, la variation de pression correspondant à 10 m d'eau est égale à 1,006 bar, valeur proche de 1 bar. Il en résulte que pour les calculs approchés, on considérera qu'une dénivellation de 10 m d'eau, qu'elle soit douce ou de mer, correspond à une variation de 1 bar.

Un plongeur sous marin, en immersion au niveau de la mer, est ainsi soumis à une pression absolue égale à la pression atmosphérique (1 bar) additionnée de la pression hydrostatique (1 bar tous les 10 m de profondeur). Un plongeur à 10 m subit une pression de 2 bars et à 40 m, de 5 bars (figure 3 ci-dessous).

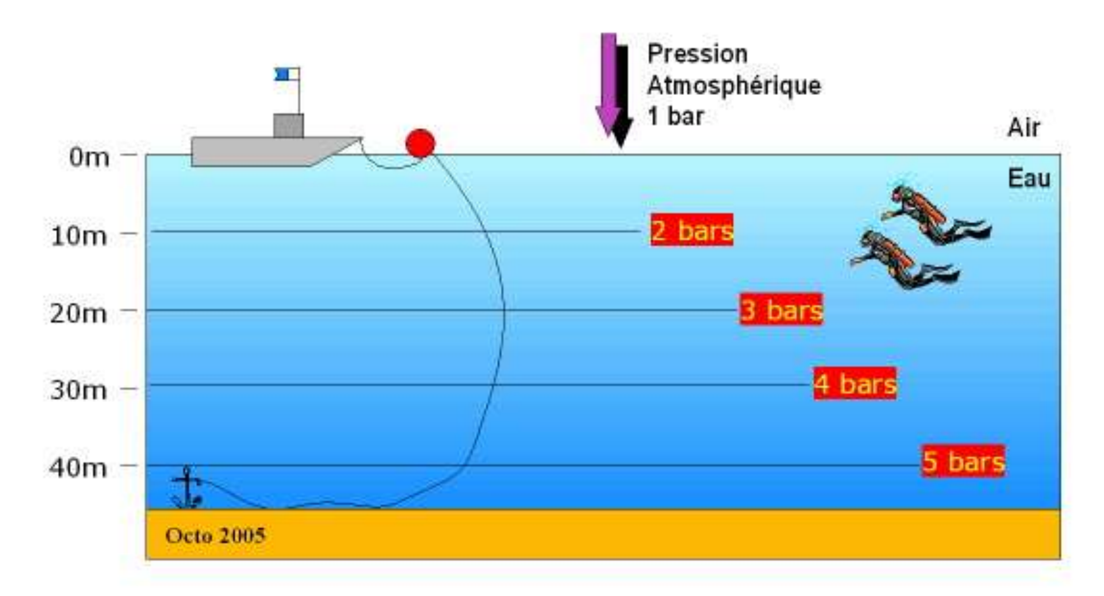


Figure 3 : Variation de la pression absolue subie par le plongeur suivant la profondeur d'immersion

(Source : Internet ; http://octo75.free.fr/Formation/N2/Physique_N2.htm)

On constate que les variations relatives de pression supportées par le plongeur sont plus importantes lorsque les profondeurs sont faibles. Le plongeur qui passe de la surface à 10 m de profondeur voit sa pression absolue doubler, alors que celui qui passe de 30 à 40 m la voit multipliée par seulement 1,25 (5/4). Cette remarque prend toute son importance dans la compréhension des accidents barotraumatiques proches de la surface.

2.2.1.2 Lois physiques et concepts fondamentaux

L'exposition de l'organisme humain aux conditions hyperbares induit des modifications physiologiques qui, potentiellement, peuvent s'avérer dommageables. Leur origine relève le plus généralement des propriétés physicochimiques exposées ci-après.

Compressibilité des gaz

Au contraire des liquides et des solides, les gaz sont compressibles. Cela signifie que si on soumet une quantité donnée de gaz à une augmentation de pression, à température constante, son volume va diminuer.

Pour les interventions hyperbares, cela a pour conséquence :

- qu'en **phase de compression** (lors de la descente en plongée ou lors de la mise sous pression d'une enceinte en milieu sec), les gaz diminuent de volume car la valeur de la pression absolue de l'enceinte (milieu sec), ou appliquée sur le plongeur, augmente.
- qu'en **phase de décompression** (lors de la remontée en plongée ou lors du retour à la pression atmosphérique d'une enceinte en milieu sec), le volume des gaz augmente car la valeur de la pression absolue diminue.

Ces variations de volume de gaz sont à l'origine des barotraumatismes des travailleurs hyperbares (*cf. chapitre 3.2.2.).*

Pour les « gaz parfaits », c'est-à-dire pour des gaz dont la valeur de la pression est proche de zéro, il existe une relation entre la pression, P , appliquée à une masse de gaz exprimée en nombre de moles, n, son volume, V, et la température, T, (T est en Kelvin = température en degrés Celsius + 273, 15).

$$PV = nRT$$

R est la constante des gaz parfaits. Dans le système d'unités adopté, elle est égale à 8,3144621 $J.mol^{-1}.K^{-1}$. Pour les calculs, la valeur approchée R = 8,314 $J.mol^{-1}.K^{-1}$ sera utilisée.

A température constante, cette relation se réduit à celle proposée par Boyle et Mariotte :

$$PV = cste$$

La loi des gaz parfaits, (ou celle de Boyle-Mariotte) ne s'applique généralement pas aux gaz utilisés dans les interventions hyperbares, dont la pression est très différente de zéro. Dans ces conditions, on a affaire à des gaz « réels ». Les valeurs de pression et de volume peuvent être liées par des équations empiriques ou semi empiriques dont la plus connue est l'équation de Van der Waals.

$$(P + \frac{n^2 a}{V^2})(V - nb) = nRT$$

Dans cette relation le coefficient, a, traduit les interactions attractives entre les molécules de gaz, et le coefficient, b, exprime le fait que les gaz ne sont pas infiniment compressibles.

Tableau 1 : Coefficients a et b de l'équation de Van der Waals pour quelques gaz (Modern Thermodynamisc, D. Kondepudi et I. Prigogine, John Wiley & Sons 1998)

gaz	a/ $kPa.dm^6.mol^{-2}$	b/ $dm^3.mol^{-1}$
hélium	3,45	0,0237
azote	140,8	0,0391
oxygène	137,8	0,0318

Une autre manière de rendre compte des propriétés des gaz réels est d'introduire un coefficient de compressibilité isotherme, z, tel que :

$$PV = z\, nRT$$

Les valeurs de z sont tabulées pour différentes pressions et températures pour un grand nombre de gaz et de mélanges gazeux. Pour l'air à 0°C (conditions normales), on trouve les valeurs reportées dans le tableau 2 ci-dessous.

Tableau 2 : Coefficients z de compressibilité de l'air à 0°C, référés au comportement de l'air dans des conditions normales (z°, 273 K, 1atm). (Nouveau traité de chimie Minérale Tome 1, P. Pascal, Masson 1955)

P/atm	1	100	150	200	250	300	500
z/z°	1,0000	0,9730	0,9840	1,0100	1,0490	1,0975	1,34

Le comportement de l'air peut diverger de plusieurs pourcents de celui des gaz parfaits. Ainsi, à 0°C, à 100 bars, on comprime 2,7 % d'air en plus que ne le suppose la loi de Boyle-Mariotte, alors qu'à 300 bars on en comprime environ 10 % de moins et à 500 bars, 34 % de moins.

Cependant, la loi de Boyle Mariotte peut raisonnablement être employée pour décrire de façon approchée le comportement des gaz réels. Elle donne une idée des grandeurs impliquées. En revanche, elle ne peut être utilisée pour des calculs précis, par exemple de consommation en gaz des travailleurs, ou encore pour prévoir les quantités de gaz contenu dans les récipients à haute pression.

En conditions hyperbares, les phénomènes de compression et de décompression des gaz au sein des cavités aériennes de l'organisme du travailleur peuvent être responsables de lésions (*c.f. chapitre 3.2.2.).*

Loi de Dalton

Lorsque l'on mélange dans une enceinte plusieurs gaz parfaits à la même température, on obtient un gaz qui présente également les propriétés d'un gaz parfait. Pour une température donnée, la pression du mélange est la somme des pressions qu'auraient les différents gaz s'ils occupaient seuls le volume du récipient. Ces pressions sont appelées « pressions partielles ».

Dans ces conditions, la valeur de la pression partielle d'un gaz est égale au produit de sa fraction molaire par la pression totale du mélange. La fraction molaire d'un gaz (X_i) est égale à son pourcentage en volume divisée par 100. Par exemple, pour un mélange d'azote et d'oxygène :

$$X_{O_2} = \frac{n_{O_2}}{n_{O_2} + n_{N_2}} = \frac{\%O_2}{100}$$

$$X_{N_2} = \frac{n_{N_2}}{n_{O_2} + n_{N_2}} = \frac{\%N_2}{100}$$

$$X_{O_2} + X_{N_2} = 1$$

n_{O_2} et n_{N_2} sont les nombres de moles d'oxygène et d'azote dans le mélange.

Ainsi, dans l'air constitué de 21 % d'oxygène et de 79 % d'azote en volume, les fractions molaires des deux gaz sont pour O_2, 0,21 et pour N_2, 0,79. La pression partielle de l'oxygène dans l'air, à la pression P est :

$$P_{O_2} = X_{O_2} P = \frac{\%\,O_2}{100} P = 0{,}21\,P$$

Sous l'effet des variations de la pression absolue, les valeurs des pressions partielles des gaz changent et peuvent atteindre des valeurs critiques au-delà desquelles apparaissent des effets toxiques pour l'organisme (*cf chapitre 3.2.4*). La limitation réglementaire des durées d'inhalation des gaz respiratoires et celle des valeurs de pressions partielles, lors des interventions en conditions hyperbares, permet d'éviter l'apparition des effets toxiques.

Loi de Henry

A température constante, les gaz sont solubles dans les liquides jusqu'à une concentration limite correspondant à une situation d'équilibre : la solution est alors saturée en gaz. L'équilibre est totalement défini par les valeurs de la pression partielle du gaz et de sa concentration en solution (concentration = quantité du gaz dissous par unité de volume). Considérant un mélange gazeux présentant les propriétés des gaz parfaits, mis en présence d'un liquide, on démontre qu'à température et pression totale constante, il existe une proportionnalité entre la pression partielle du gaz et sa concentration à l'équilibre en solution (Loi de Henry).

Par exemple, pour un mélange d'azote et d'oxygène mis en présence d'eau à la température T et à la pression absolue P :

$$P_{O_2} = X_{O_2} P = K_{hO_2} \ C_{O_2}$$

$$P_{N_2} = X_{N_2} P = K_{hN_2} \ C_{N_2}$$

K_{hO_2} et K_{hN_2} sont les constantes de Henry caractéristiques des deux gaz et du solvant considéré.

Strictement, les valeurs des constantes de Henry dépendent de la pression absolue à température constante. Cependant, pour des calculs approchés, on peut admettre que ces valeurs sont sensiblement constantes, auquel cas, la validité des relations précédentes est étendue aux pressions absolues variables.

Pour faciliter les calculs de solubilité, on définit la « tension d'un gaz » (T_i) en solution, comme la pression partielle qu'aurait ce gaz s'il était en équilibre de Henry avec sa concentration en solution. Par exemple, pour une solution dont la concentration d'oxygène est C_{O_2}, la tension de O_2 est telle que :

$$T_{O_2} = K_{hO_2} \ C_{O_2}$$

Cette définition implique que, lorsque le système est en équilibre de solubilité, la valeur de la tension est égale à celle de la pression partielle du gaz ; il s'agit de l'état de saturation.

Lors d'une intervention en conditions hyperbares, l'organisme doit s'adapter aux conséquences de la dissolution des gaz respirés (N_2, O_2, He, CO_2). Pendant la phase de compression, le sang puis les tissus irrigués se chargent en gaz dissous sous l'effet de l'augmentation de la pression. Il s'agit de la phase de dissolution. Dans cette situation, les valeurs des tensions des gaz sont inférieures à celles de leurs pressions partielles. Les solutions sont dites « sous-saturées ».

A l'inverse, pendant la phase de décompression, les gaz dissous emmagasinés dans les tissus ont tendance à reprendre leur état gazeux. Au fur et à mesure que la pression ambiante diminue, le gaz en excès doit être évacué des tissus vers le sang, puis du sang vers les poumons par le biais des alvéoles. Il s'agit du **phénomène de désaturation**. Dans cette situation, la valeur de la tension des gaz est supérieure à celle de leur pression partielle. Les solutions sont dites « sursaturées ».

Tous les tissus de l'organisme ne sont pas irrigués de la même manière et ne solubilisent pas les gaz identiquement. Il en résulte que la dissolution des gaz dans l'organisme du travailleur hyperbare n'est pas instantanée et que la quantité de gaz dissous dépend de la nature des tissus, de leur masse, des gaz considérés (principalement l'azote et l'hélium), et des pressions partielles des gaz respirés pendant l'intervention.

La décompression doit obéir à des procédures précises (tables ou ordinateur) afin d'éviter que les petites bulles de gaz, qui se forment inévitablement lors de la baisse de pression ambiante, ne grossissent de manière incontrôlée, ce qui aurait pour conséquence d'entraver la circulation sanguine (risque d'ADD, *c.f. chapitre 3.2.3*). Les procédures de décompression fixent les valeurs des vitesses de remontée et imposent des arrêts conventionnels (paliers) de manière à éliminer les gaz en excès. Ces procédures doivent être rigoureusement suivies.

2.2.2 Définition réglementaire du milieu hyperbare

Le décret n° 2011-45 du 11 janvier 2011 définit le milieu hyperbare comme un milieu dans lequel les travailleurs sont appelés à intervenir à une pression relative supérieure à 100 hPa dans l'exercice de leurs activités réalisées en immersion (travaux publics sous-marins, travaux pétroliers, plongée scientifique…) ou au sec (creusement de tunnels, travail en caisson hyperbare hospitalier…). La pression relative considérée est définie comme la pression absolue au niveau des voies respiratoires du travailleur, au moment où elle atteint sa valeur maximale pendant la durée de travail, diminuée de la pression atmosphérique locale.

Les travailleurs concernés sont :

- Les salariés de toutes entreprises, y compris les associations, et les établissements publics (Article L4111-1 du Code du travail) ;
- Les artisans dès qu'ils interviennent dans le bâtiment et le génie civil (Article L4535 du Code du Travail) ;
- Les artisans dès qu'ils interviennent dans une autre entreprise (Article R4512-7 du Code du travail et Article R4513-9).

Les interventions en milieu hyperbare nécessitent une adaptation du travailleur à un environnement professionnel très particulier et dangereux.

2.3 Les gaz et mélanges respiratoires : présentation, intérêts et limites

2.3.1 Réglementation

Le décret n° 2011-45 du 11 janvier 2011 relatif à la protection des travailleurs intervenant en milieu hyperbare définit les gaz respiratoires autorisés lors des interventions en conditions hyperbares ainsi que les exigences à respecter en termes de composition de ces gaz (pressions partielles limites).

Les exigences en termes de qualité des mélanges de gaz respiratoires comprimés (air et autres combinaisons d'oxygène, d'azote ou d'hélium…) « stockés » en vue d'une utilisation lors des opérations en conditions hyperbares sont définies par des normes (ex : NF 12021 « Appareils de protection respiratoire - Gaz comprimés pour appareil de protection respiratoire »). Les analyses de conformité de la qualité des gaz stockés sont réalisées à pression atmosphérique et exprimées en concentrations (% ou ppm). Elles ne sont valables que pour une éventuelle respiration à pression voisine de 1 bar de pression absolue.

La conformité d'utilisation d'un gaz tel qu'il est effectivement « respiré » par les travailleurs au cours d'une intervention sous pression, est liée aux caractéristiques techniques et environnementales de l'intervention : pression ambiante ; utilisation d'un détendeur, plongée au recycleur ou autre (intervention en immersion) ; atmosphère de travail et système de ventilation (intervention au sec). Le contrôle de la qualité d'un gaz « stocké » *via* l'analyse réalisée à pression atmosphérique ne garantit donc pas la qualité de ce gaz s'il est respiré à une pression autre que la pression atmosphérique « normale ». A titre d'exemple, de l'air comprimé stocké dans une bouteille de plongée et conforme aux normes « air respirable » ne pourra pas être respiré au-delà de 50 mètres de profondeur en plongée ; de même l'air ainsi défini ne convient plus au-delà d'une altitude de 4500 m environ.

L'effet physiologique d'un composant d'un mélange est conditionné par la pression partielle à laquelle il est respiré et par la durée d'exposition. L'employeur est responsable du choix et de la qualité de l'air et des mélanges mis à la disposition de son personnel. A ce titre, il est tenu de s'assurer par analyse, et avant leur utilisation, de la conformité des gaz respirés aux valeurs limites d'exposition professionnelle (VLEP) fixées par le décret, en tenant compte des pressions d'exposition. Ces valeurs limites concernent non seulement les gaz respiratoires (azote, oxygène, hélium…), mais également d'autres gaz pouvant être présents à l'état de traces (gaz carbonique, monoxyde de carbone, vapeur d'eau…), des poussières ainsi que des contaminants chimiques divers, susceptibles de constituer des polluants délétères s'ils sont respirés à des pressions partielles interdites (*cf* ci-après) ; ces limites doivent être exprimées en pressions partielles (bar, hPa, voire µbar) pour être applicables quelle que soit la pression.

Pour effectuer cette vérification il convient de multiplier la concentration obtenue suite à l'analyse à pression atmosphérique (en valeur décimale) par la pression absolue à laquelle le gaz doit être respiré et de comparer la valeur obtenue avec la valeur limite exprimée elle aussi en pression partielle (Le Péchon, 1996 ; 2013).

Exemple :

L'analyse de l'air sortant d'un compresseur donne pour le monoxyde de carbone (CO) la concentration suivante :

$$\text{Conc. CO} = 8{,}5 \text{ ppm (soit } 8{,}5.10^{-6})$$

Au cours d'une intervention en plongée en scaphandre autonome en circuit ouvert à 30 mètres de profondeur, la pression partielle de monoxyde de carbone sera de :

$$\text{PpCO} = 8{,}5.10^{-6} * (3 + 1) = 34.10^{-6} \text{ bar (ou 34 µbar)}$$

La valeur limite d'exposition étant de 50 ppm, soit 50 µbar ou 5 Pa à pression atmosphérique, ce gaz est donc conforme pour une utilisation à 30 mètres de profondeur.

En revanche, pour une plongée dans les mêmes conditions à 50 mètres de profondeur, la PpCO atteint 51 µbar et sera donc supérieure à la VLEP, rendant ce gaz inutilisable. Il existe également une restriction spécifique d'utilisation de l'oxygène dans les atmosphères sèches pressurisées qui n'est pas liée à des effets toxiques respiratoires. Ainsi, pour la diminution du risque incendie, la concentration d'oxygène dans une atmosphère ne doit pas excéder 25 % en volume et ceci doit être mesuré à la pression atmosphérique sur un échantillon de gaz prélevé à partir de l'atmosphère hyperbare à contrôler.

2.3.1.1 Choix des gaz respiratoires

Les gaz ou mélanges gazeux respiratoires autorisés dans le cadre des interventions et travaux réalisés en milieu hyperbare (hors apnée) sont :

- l'air ;
- un autre mélange gazeux ;
- l'oxygène pur.

Le choix du gaz respiratoire est fait par l'employeur suivant le type d'interventions réalisées en conditions hyperbares par ses salariés.

La respiration d'air comprimé est autorisée jusqu'à la pression relative de 6 000 hectopascals (hPa) ou pression absolue de 7 bars (60 mètres de profondeur), dans certaines circonstances exceptionnelles prévues par la réglementation. Au-delà de 7 bars en pression absolue, des mélanges respiratoires spécifiques doivent être utilisés.

2.3.1.2 Composition des gaz respiratoires

- **Azote**

La pression partielle d'azote dans un mélange respiré doit être inférieure à 5 600 hectopascals ou 5,6 bars.

- **Oxygène**

Limites inférieures de concentration

La pression partielle d'oxygène d'un mélange respiré ne doit pas être inférieure à 160 hectopascals soit 160 millibars.

Limites supérieures de concentration

Dans une enceinte hyperbare de travail, la pression partielle d'oxygène ne doit pas dépasser 25% de la pression absolue.

En période d'activités physiques, en dehors des phases de compression et de décompression, la pression partielle d'oxygène ne doit pas dépasser :

- 1 600 hPa soit 1,6 bar pour une durée continue d'exposition n'excédant pas 3 heures ;
- 1 400 hPa soit 1,4 bar pour une durée continue d'exposition n'excédant pas 4 heures ;
- 1 200 hPa soit 1,2 bar pour une durée continue d'exposition n'excédant pas 5 heures ;
- 1 000 hPa soit 1 bar pour une durée continue d'exposition n'excédant pas 6 heures ;
- 900 hPa soit 0,9 bar pour une durée continue d'exposition n'excédant pas 8 heures.

Lors de la phase de décompression :

- en immersion, la pression partielle d'oxygène ne doit pas dépasser 1 600 hPa soit 1,6 bar ;
- au sec, la pression partielle d'oxygène ne doit pas dépasser 2 200 hPa soit 2,2 bars pour une décompression d'une durée inférieure à 24 heures et 800 hPa soit 0,8 bar pour une décompression d'une durée supérieure à 24 heures ;

Lors des phases de compression, la pression partielle d'oxygène doit se situer entre 300 hPa soit 0,3 bar et 450 hPa soit 0,45 bar.

Lors d'une recompression d'urgence après un accident de décompression, la pression partielle d'oxygène ne doit pas dépasser 2 800 hectopascals soit 2,8 bars, sauf prescription médicale différente.

La respiration d'oxygène pur sous pression avec un appareil de protection respiratoire individuel est autorisée durant les périodes de décompression conformément aux procédures définies par arrêté (ou aux périodes de traitement des accidents liés à l'hyperbarie).

➢ **Autres composants (« polluants » des mélanges respiratoires)**

Les gaz respirés au cours des interventions et travaux doivent présenter les caractéristiques suivantes :

- Concernant le gaz carbonique (CO_2), une pression partielle inférieure à 10 hectopascals soit 10 millibars ;
- Concernant le monoxyde de carbone, une pression partielle inférieure à 5 pascals soit 0,05 millibar ;
- Concernant la vapeur d'eau, pour les expositions d'une durée supérieure à 24 heures, un degré hygrométrique compris entre 60% et 80% ;
- Concernant les vapeurs d'huile, une pression partielle exprimée en équivalent méthane inférieure à 0,5 hectopascal soit 0,5 millibar et une concentration inférieure à 0,5 mg/m^3.

Les concentrations moyennes en poussières totales et alvéolaires ainsi que les concentrations des agents chimiques inhalés par les travailleurs doivent respecter les valeurs limites d'exposition professionnelle (VLEP) fixées par le code du travail (articles R. 4222-10, R. 4412-149 et R. 4412-150). Toutefois, ces valeurs étant élaborées pour une exposition des travailleurs à la pression atmosphérique, elles nécessitent d'être transposées en pressions partielles pour être applicables en situation hyperbare quelle que soit la pression à laquelle interviennent les travailleurs.
La masse volumique d'un mélange respiratoire ne doit pas excéder 9 grammes par litre à la pression d'utilisation.

2.3.2 Air comprimé

2.3.2.1 Définition

L'air est le gaz respiratoire le plus utilisé pour les interventions en conditions hyperbares.

L'air comprimé est fabriqué par compression puis filtration d'air atmosphérique, il est délivré à l'aide d'un détendeur aux travailleurs en plongée ou via un système d'alimentation dans les enceintes hyperbares (chambres thérapeutiques hyperbares et sas de tunneliers).

L'air est composé à 78% d'azote, à 21% d'oxygène et le reste de gaz carbonique (CO_2) et d'Argon et autres gaz rares.

2.3.2.2 Profil d'utilisation

L'air comprimé est utilisable en milieu humide et en milieu sec.

En plongée, il est utilisé pour alimenter en gaz respiratoire les scaphandres autonomes (cf chapitre 2.4.1 Scaphandre autonome (alimenté par des bouteilles de gaz)) ou les narguilés (cf chapitre 2.4.2 Narguilé), dans le respect des profondeurs autorisées.

Au sec, il est utilisé pour alimenter en gaz respiratoire les chambres thérapeutiques hyperbares (cf chapitre 2.4.4 Chambre hyperbare) et les sas de tunneliers (cf chapitre 2.4.5 Tunnelier et sas de tunnelier), dans le respect des pressions autorisées.

2.3.2.3 Intérêts

L'alimentation en air comprimé des équipements pour intervenir en conditions hyperbares est très développée car aisément disponible.

C'est un gaz plus simple à mettre en œuvre comparativement aux autres mélanges respiratoires dont l'utilisation requiert de suivre une formation spécifique dispensée par des organismes reconnus et compétents ainsi que le port d'équipements spécifiques.

2.3.2.4 Limites

L'utilisation de l'air comprimé se heurte aux limites physiologiques liées à la toxicité de ses composants et notamment de l'azote. Dès 4 bars en pression absolue (profondeur équivalente de 30 mètres), les premiers signes d'une intoxication à l'azote peuvent apparaitre (cf chapitre 3.2.4.3 Toxicité des gaz inertes). Ce gaz respiratoire ne doit pas (sauf circonstances exceptionnelles prévues par la réglementation) être utilisé au-delà de 6 bars de pression absolue ou 50 mètres de profondeur en plongée. Une hyperoxie peut apparaitre mais de manière anecdotique car *a priori* la narcose à l'azote survient bien avant.

Les utilisateurs encourent le risque de narcose à l'azote, les premiers effets apparaissant dès 4,5 à 5,5 bars de pression absolue (35 à 45 mètres de profondeur en plongée).

De même, les risques d'accidents de désaturation en azote ne sont pas négligeables, notamment dès que le taux de saturation nécessite d'effectuer des paliers de décompression.

La densité élevée de l'azote rend par ailleurs plus difficile la mécanique ventilatoire et augmente les risques d'essoufflement, la fatigue et les migraines post-plongée.

2.3.3 Oxygène pur en décompression

2.3.3.1 Définition

La respiration d'oxygène pur durant la décompression a pour objectif d'améliorer le profil de décompression. La respiration d'oxygène pur modifie les échanges gazeux et permet d'éliminer plus vite l'azote, accélérant ainsi la désaturation.

Par ailleurs, l'augmentation de la pression partielle d'oxygène ventilée améliore l'oxygénation des tissus qui pourraient être touchés par un début d'accident de désaturation, équivalent à une oxygénothérapie préventive.

2.3.3.2 Profil d'utilisation

- Paliers à l'oxygène

L'utilisation d'oxygène pur en décompression consiste à inhaler de l'oxygène pur par palier durant la décompression. Cette procédure peut être réalisée en plongée et également dans les enceintes

hyperbares (chambre thérapeutique ou sas de tunnelier), au cours de la phase de diminution de la pression de travail.

Il est également possible de réaliser des paliers de décompression en respirant un mélange Nitrox contenant plus de 60% d'oxygène.

En milieu professionnel, les plongeurs réalisent leurs paliers grâce à la mise en place d'une ligne à paliers. Il s'agit d'un dispositif immergeable, relié à la surface et permettant au scaphandrier d'identifier sous l'eau la profondeur à laquelle il doit effectuer ses paliers de décompression et s'y maintenir. La mise en place d'une ligne à paliers permet donc de limiter l'utilisation de la bouteille à 6 mètres, afin de prévenir le risque hyperoxique lié à la respiration d'une pression partielle d'oxygène trop élevée (supérieure à 1,6 bar).

Le plongeur peut disposer d'une réserve de gaz supplémentaire indépendante pour la décompression (bloc de décompression). Pendant la plongée, le plongeur respire de l'air et lors de la remontée, arrivé au palier, il va utiliser son bloc de décompression et inhaler de l'oxygène pur (ou un mélange Nitrox adapté à la profondeur).

En atmosphère sèche, la réalisation de paliers (caisson ou sas de tunneliers) se fait *via* la respiration d'oxygène pur (ou un mélange Nitrox adapté) directement au masque avec un rejet de l'oxygène vers l'extérieur de l'enceinte pour éviter les risques liés à une augmentation du pourcentage d'oxygène dans l'air ambiant.

- Décompression de surface à l'oxygène

Il arrive que les travailleurs hyperbares reviennent à la pression atmosphérique avant d'avoir effectué leurs paliers de décompression (volontairement ou non) et soient alors recomprimés puis décomprimés dans un caisson de recompression sur site, sous oxygène hyperbare.

Dans le cas d'une recompression d'urgence de sécurité, il est possible que le travailleur soit pris en charge en oxygène normobare, le temps de la prise en charge en caisson.

2.3.3.3 Intérêts

L'inhalation d'oxygène pur (ou d'un mélange suroxygéné) pendant la décompression permet de prévenir la survenue des accidents de désaturation en diminuant le niveau de bulles circulantes produites pendant la décompression. Suivant le profil de l'intervention et à niveau de sécurité identique, il est possible que les temps de palier à l'oxygène soient réduits comparativement à une décompression à l'air. Elle permet également de limiter la fatigue liée au phénomène de saturation/désaturation de l'azote.

Dans le cas d'une procédure de décompression de surface à l'oxygène, les avantages sont les mêmes que ceux des paliers subaquatiques à l'oxygène, mais avec la sécurité apportée par le fait que les opérations se déroulent au sec et auquel vient s'ajouter le confort lié à la température permettant de limiter les phénomènes de lutte contre le froid.

2.3.3.4 Limites

L'utilisation de l'oxygène en décompression est limitée par les effets toxiques de l'oxygène (cf chapitre 3.2.4.1 Toxicité de l'oxygène).

La plongée avec décompression planifiée avec des gaz différents nécessite une solide formation, une parfaite rigueur et si possible une connaissance de ses propres limites physiologiques.

Par ailleurs, l'utilisation d'oxygène hyperbare en atmosphère sèche expose à des risques d'incendie.

2.3.4 Mélange de gaz autres que l'air (Nitrox, Héliox et Nitrhéliox)

2.3.4.1 Présentation

Les interventions hyperbares réalisées en respirant des mélanges gazeux autres que l'air permettent de pallier certaines contraintes physiologiques imposées par la plongée à l'air :

- Pour contrer les effets de la narcose à l'azote, il est possible de réduire son pourcentage dans le mélange ou de remplacer l'azote par un gaz non narcotique, tel l'hélium ;
- Pour limiter l'essoufflement, un gaz moins dense tel que l'hélium est intégré dans le mélange, en remplacement ou en complément de l'azote ;
- Le risque d'ADD est réduit en diminuant le pourcentage d'azote dans le mélange, en faveur du pourcentage d'oxygène par exemple, pour obtenir un mélange Nitrox (O_2 et N_2) ;
- Les effets indésirables post-plongée de types migraine et fatigue peuvent être limités grâce à l'utilisation de Nitrox en mélange « fond » et/ou en faisant des paliers de décompression à l'oxygène pur ou aux mélanges Nitrox suroxygénés ;
- Le risque hyperoxique peut être réduit en diminuant le pourcentage d'oxygène dans le mélange et/ou en limitant la pression partielle d'oxygène.

Les interventions aux mélanges sont déjà très développées dans les milieux de la défense ou de la sécurité civile, le travail professionnel en spéléologie, ou encore la photo-vidéographie sous-marine. Leur mise en œuvre dans les bonnes conditions, permet d'apporter une sécurité plus importante en cours d'intervention.

2.3.4.2 Nitrox

<u>Définition</u>

Le Nitrox est un mélange respiratoire binaire constitué d'azote et d'oxygène dans des proportions différentes de celles de l'air. Le principe de ce mélange est de diminuer le pourcentage d'azote dans le mélange respiratoire pour diminuer les effets narcotiques.

En hyperbarie professionnelle, seuls les Nitrox dits « suroxygénés » c'est-à-dire dont le pourcentage d'oxygène dans le mélange dépasse 21% sont utilisés.

<u>Profil d'utilisation</u>

Les mélanges Nitrox utilisés en tant que gaz « fond » en conditions professionnelles sont des Nitrox contenant 30 à 60% d'oxygène, qui respectent la valeur limite réglementaire de la pression partielle d'oxygène (PpO_2) autorisée pour ce type d'utilisation, fixée réglementairement par sécurité à 1,4 bar (Décret n°2011-45 du 11 janvier 2011).

Les mélanges Nitrox utilisés en tant que gaz de décompression en conditions professionnelles sont des Nitrox contenant plus de 60% d'oxygène (« Surox ») qui respectent la valeur limite réglementaire de PpO_2 autorisée pour ce type d'utilisation, fixée réglementairement par sécurité à 1,6 bar (Décret n°2011-45 du 11 janvier 2011).

<u>Intérêts</u>

L'azote est le gaz le plus contraignant dans la plongée à l'air, de par sa toxicité et le fait que son utilisation requiert une décompression précise et longue. Dans les interventions aux mélanges Nitrox, le pourcentage d'azote dans le gaz respiré est moindre comparativement au pourcentage lors d'une intervention à l'air. Ainsi à profondeur et temps équivalents, la quantité d'azote dissoute sera diminuée, les procédures de décompression écourtées (réduction de paliers) et le risque de narcose réduit. L'accumulation d'azote dans les tissus étant réduite, la fatigue due au dégazage est diminuée.

Les conditions physiologiques de la décompression sont améliorées, offrant notamment un avantage dans le cas des plongées à risques de type ludion (ou « yoyo »).

Les personnes présentant des facteurs de risques d'accident de désaturation (effort, plongée en eau froide…) peuvent optimiser la sécurité de leur plongée en respirant un mélange Nitrox tout en suivant une procédure de décompression des tables à l'air.

La plongée est plus confortable et offre au plongeur une sensation de lucidité en profondeur, au regard des effets narcotiques (même légers) de la plongée à l'air. Par ailleurs, l'intervalle de temps passé en surface avant une plongée en mode successif est réduit en comparaison avec celui des plongées effectuées à l'air.

Limites

Le pourcentage d'oxygène dans le mélange Nitrox limite les profondeurs d'intervention comparativement aux interventions à l'air, en lien avec l'apparition des effets toxiques aigus de l'oxygène au-delà d'une certaine pression partielle (risque d'accident hyperoxique). Le Nitrox 30% d'oxygène est donc un gaz très avantageux jusqu'à 30 mètres en circuit ouvert, mais au-delà de cette profondeur, il perd de son intérêt car le risque hyperoxique impose un taux d'oxygène approchant celui de l'air.

L'emploi des mélanges n'est pas aussi simple que l'utilisation de l'air et nécessite une logistique adaptée. La respiration de Nitrox en plongée impose notamment de disposer d'un matériel spécifique répondant aux normes Nitrox (NF EN 144-3 et NF EN 13949), les modalités d'approvisionnement et de fabrication des gaz sont plus complexes et coûteuses.

2.3.4.3 Nitrhéliox ou Trimix

Définition

Le Nitrhéliox est un mélange respiratoire ternaire constitué d'oxygène, d'azote et d'hélium. Son principe est de remplacer dans le mélange respiratoire une partie de l'azote par un gaz moins narcotique et présentant moins d'effets sur l'organisme à savoir l'hélium. Parallèlement, le pourcentage d'oxygène est diminué comparativement à un mélange binaire.

Un Nitrhéliox est défini à la pression atmosphérique (1 bar) par sa teneur en oxygène et hélium, permettant de distinguer classiquement trois types de Nitrhéliox :

- Nitrhéliox Normoxique, comprenant entre 18 et 21% d'oxygène ;
- Nitrhéliox Hyperoxique ou Suroxygéné, comprenant plus de 21% d'oxygène (utilisés en décompression) ;
- Nitrhéliox Hypoxique, comprenant moins de 18% d'oxygène.

Profil d'utilisation

Le choix d'un Nitrhéliox se fait en fonction de la profondeur que l'on veut atteindre. Il faut tenir compte de 2 paramètres : la PpO_2 maximale autorisée en mélange fond (1,4 bar) et l'effet narcotique que l'on accepte de subir ou « Profondeur Narcotique Equivalente » (PNE ou END en Anglais).

A titre d'exemple, pour déterminer la composition d'un mélange Nitrhéliox permettant de plonger à 50 mètres de profondeur dans le respect des PpO_2 limites autorisées et dont la PNE sera de 40 mètres, il faudra procéder comme suit :

1) Sachant que le pourcentage d'oxygène est égal au quotient de la PpO_2 limite par la P.Abs à la profondeur visée ; pour une PpO_2 max de 1,4 et une profondeur de 50 mètres (P.Abs = 6 bars), le pourcentage d'oxygène dans le mélange sera de 23% (1,4 / 6 = 0,23) ;

2) Le pourcentage d'azote est égal au produit de la P.Abs à 30 mètres (4 bars) par le pourcentage d'azote dans l'air en valeur décimale (0,79), divisé par la P.Abs à 50 mètres (6 bars). Le taux d'azote dans le mélange sera donc de 53% (4 x 0,79 / 6 = 0,53) ;

3) L'espace encore disponible dans le mélange est de 24% (100-(23+53) = 24), il sera occupé par l'hélium.

Au final, le mélange sera donc composé de 23% d'O_2, 53% de N_2, et 24% d'He.

Le Nitrhéliox est plus intéressant que l'air pour des plongées entre 40 et 70 mètres de profondeur. Au-delà, il est préférable de travailler avec un mélange Héliox en milieu professionnel pour des questions financières et en raison du profil de décompression (cf chapitre 2.3.4.4 sur l'Héliox).

Intérêts

L'ajout d'hélium dans le mélange apporte un double effet bénéfique par rapport à l'air. Il permet d'une part, de limiter le pourcentage d'oxygène et ainsi d'augmenter la profondeur limite d'utilisation du mélange. D'autre part, il permet de diminuer le pourcentage d'azote et ainsi de diminuer la profondeur narcotique équivalente du mélange.

Comparativement à l'air, le gain d'un Nitrhéliox normoxique au niveau de la narcose est essentiel dès 40 mètres de profondeur, puisque le moindre problème survenant dans ces profondeurs peut vite dégénérer en accident si le travailleur ne dispose pas de toutes ses facultés intellectuelles. Le fait de ne pas être narcosé peut donc faire la différence entre incident et accident.

Par ailleurs, passés 40 mètres de profondeur, les paliers de décompression s'accumulent rapidement.

Le mélange Nitrhéliox est plus facile à respirer que l'air du fait de la faible densité de l'hélium, permettant de réduire le risque d'essoufflement et de limiter le risque d'hypercapnie (cf chapitre 3.2.4.2 Toxicité du gaz carbonique ($CO2_{)}$).

Limites

L'hélium est un gaz moins soluble que l'azote dans les graisses et le sang ; parallèlement, l'hélium diffuse plus vite que l'azote dans l'organisme. L'ajout d'hélium dans un mélange respiratoire présente l'inconvénient d'augmenter la profondeur et la durée des paliers de décompression.

La capacité calorifique de l'hélium est beaucoup plus forte que celle de l'azote, impliquant que c'est un gaz qui va entrainer un refroidissement beaucoup plus rapide de l'organisme du plongeur que l'air (Jammes *et al.*, 1988).

L'hélium étant un gaz très léger, le Nitrhéliox est plus facile à inspirer et expirer à travers un détendeur que ne l'est l'air. Ainsi, la quantité de mélange consommée en plongée Nitrhéliox peut être supérieure à la quantité de mélange respirée lors d'une plongée à l'air.

Les bouteilles se vident donc plus vite, s'ajoutant à cela le fait que l'hélium est un gaz très onéreux (beaucoup plus cher que l'air), les plongées aux mélanges Nitrhéliox sont plus coûteuses. Au prix des gaz, vient s'ajouter le prix du matériel spécifique nécessaire à la plongée Nitrhéliox. L'utilisation du Nitrhéliox est pour le moment limitée en conditions professionnelles puisqu'il n'existe pas de procédures de décompression validées par le Ministère du travail.

Une attention particulière doit être apportée à l'utilisation des mélanges Nitrhéliox hypoxiques qui ne sont pas respirables à la pression atmosphérique sous peine de perte de connaissance, et potentiellement de noyade en milieu aquatique.

2.3.4.4 Héliox

Définition

L'Héliox est un mélange respiratoire binaire constitué d'oxygène et d'hélium. Son principe est de remplacer dans le mélange respiratoire l'azote par un gaz neutre moins narcotique et moins dense, l'hélium.

Profil d'utilisation

Les mélanges Héliox sont utilisés pour des plongées profondes, au-delà de 70 mètres, notamment dans le milieu professionnel, pour des plongées à saturation (hors champ de la saisine).

Intérêts

L'emploi de mélanges Héliox permet de supprimer les effets de la narcose liée à l'azote. Sa faible densité comparativement à celle de l'azote, permet également de réduire le risque d''essoufflement.

L'utilisation de mélanges Héliox permet de repousser considérablement les limites de profondeur imposées par les interventions à l'air, permettant des plongées à plus de 150 mètres de profondeur sans encourir les mêmes risques qu'avec un mélange classique.

Limites

L'Héliox présente les mêmes inconvénients liés à l'hélium que le Nitrhéliox : augmentation de la durée et de la profondeur des paliers de décompression, refroidissement de l'organisme (Burnet *et al.*, 1992) et coût élevé d'utilisation.

Par ailleurs, il nécessite des procédures de décompression spécifiques pour limiter le risque d'ADD.

Pour des pressions importantes (au-delà de 150 mètres de profondeur), l'hélium devient toxique, provoquant le syndrome nerveux des hautes pressions (SNHP) qui se manifeste par des symptômes de type vertiges, tremblements ou encore une maladresse des gestes (cf chapitre.3.2.4.3 Toxicité des gaz inertes).

2.4 Les équipements : présentation, intérêts et limites

2.4.1 Scaphandre autonome (alimenté par des bouteilles de gaz)

2.4.1.1 Définition et principe de fonctionnement

Le scaphandre autonome (ou SCUBA pour « self-contained underwater breathing apparatus ») est un dispositif individuel permettant à un plongeur d'évoluer librement grâce à une réserve portative de gaz ou mélange respiratoire.

L'équipement du plongeur intervenant en scaphandre autonome se compose généralement d'une réserve de gaz ou mélange respiratoire comprimé, d'un détendeur, d'un équipement de tête (masque facial, casque), d'une combinaison, d'un lestage et d'un système de sécurité gonflable (cf Figure 4 ci-dessous).



Figure 4 : Plongeur équipé d'un scaphandre autonome

(Source : Internet, http://www.sous-la-mer.com/actualites-plongee-13)

Dans ce chapitre, il sera uniquement question de l'utilisation des SCUBA alimentés par des bouteilles de gaz. Néanmoins, à la place des bouteilles de plongée classiques, des recycleurs peuvent être utilisés et permettent d'offrir une plus grande autonomie à l'utilisateur. Ces équipements sont développés spécifiquement dans le chapitre 2.4.3 « Recycleur ».

2.4.1.2 Conditions d'utilisation

Plusieurs types de gaz ou mélanges respiratoires peuvent être utilisés dans le cadre de la plongée en scaphandre autonome.

L'air comprimé est bien adapté pour les interventions de courtes durées, jusqu'à 50 mètres. L'arrêté d'application du décret n° 2011-45 du 11 janvier 2011 pour les travailleurs de la mention B (cf chapitre 2.6 « Secteurs d'activité concernés ») précise néanmoins des possibilités de dépassement de 50 à 60 mètres lors d'une intervention à l'air, sous réserve de dispositions de sécurité particulières. La plongée profonde à l'air atteint ses limites à 60 mètres.

Au-delà de ces tranches de profondeur, il est nécessaire d'utiliser des mélanges synthétiques suroxygénés ou sous oxygénés, contenant éventuellement de l'hélium pour les zones profondes.

L'équipe minimum requise pour le travail est de 3 personnes parmi lesquelles un chef des opérations hyperbares (COH). La fonction de COH peut être cumulée, au sein d'une même équipe, avec celle d'opérateur, d'opérateur de secours, de surveillant ou d'aide-opérateur. Le temps de travail, paliers compris, est limité à 3 heures par jour en mention A et 6 heures par jour en mention B (cf chapitre 2.6 « Secteurs d'activité concernés »).

2.4.1.3 Intérêts

Il s'agit d'une méthode de plongée simple de mise en œuvre, d'apprentissage et donc accessible à un large public.

2.4.1.4 Limites

La capacité de la réserve de gaz ou mélange respiratoire limite la durée et donc la pression maximale des interventions.

Les profondeurs et les temps de plongée sont également limités en fonction des gaz et mélanges gazeux respiratoires utilisés (cf chapitre 2.3 « Les gaz et mélanges respiratoires : présentation, intérêts et limites »).

2.4.2 Narguilé

2.4.2.1 Définition et principe de fonctionnement

Le travail hyperbare au narguilé caractérise une méthode d'intervention sans utilisation de système de plongée (cf chapitre 2.4.6.2 « Les systèmes de plongée ») et pour laquelle le travailleur est directement relié à la source de gaz par un ombilical (cf Figure 5 ci-dessous).

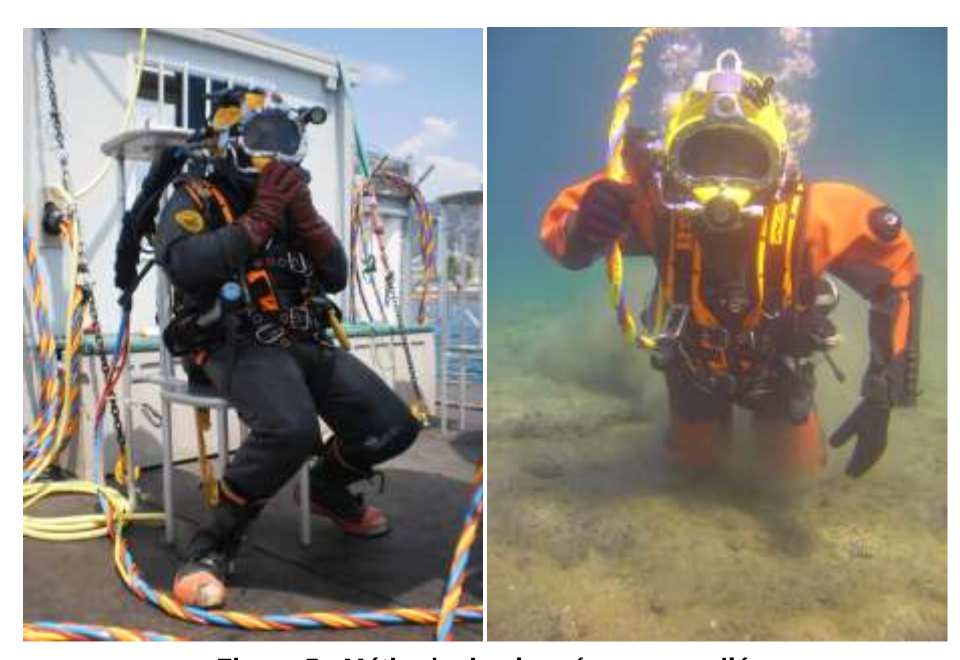


Figure 5 : Méthode de plongée au narguilé

(Source : Eric Le Maître)

Les plongeurs professionnels sont ainsi alimentés depuis la surface via cet ombilical qui fournit le mélange respiratoire et inclut une ligne de communication téléphonique ou éventuellement vidéo.

Cet ombilical sert également de « corde » de sécurité. Une bouteille dorsale permet une alimentation en gaz respiratoire de secours en cas de rupture du narguilé.

Dans le cadre de cette saisine, nous traiterons uniquement la plongée au narguilé depuis la surface jusqu'à la profondeur autorisée de 60 mètres, cette méthode de plongée étant possible également jusqu'à une profondeur de 90 mètres au départ d'une bulle de plongée.

2.4.2.2 Conditions d'utilisation

C'est le mode d'intervention le plus fréquent dans le domaine des travaux publics sous-marins. Il faut au minimum 3 personnes pour intervenir au narguilé, 2 en surface et 1 au fond.

Plusieurs types de gaz ou mélanges respiratoires peuvent être utilisés, suivant la profondeur de l'intervention. Entre 0 et 50 mètres, l'air comprimé convient ; mais au-delà de 50 mètres, il est nécessaire d'utiliser un mélange Nitrhéliox ou Héliox. L'utilisation d'air comprimé dans la tranche 50-60 mètres requiert des conditions particulières d'utilisation.

2.4.2.3 Intérêts

Cette méthode de plongée est facile à mettre en œuvre car l'équipement est identique pour tous les travailleurs.

Les capacités en gaz respirable et les paramètres de plongée sont gérés depuis la surface, permettant au travailleur en immersion de se concentrer exclusivement sur les tâches à réaliser sous l'eau.

Par ailleurs, la réserve de gaz (10 litres à 200 bars) que porte le travailleur sur lui (système de secours) présente un volume beaucoup plus faible et donc moins encombrant que celui des bouteilles de plongée utilisées lors d'une plongée en scaphandre autonome.

L'ombilical permet une communication permanente entre la surface et le scaphandrier.

2.4.2.4 Limites

L'inconvénient de ce type de plongée est qu'elle peut être contrariée voire impossible en fonction des conditions extérieures, notamment tout ce qui risque d'entraver ou d'emmêler le tuyau du narguilé (courant, tronc arbres et obstacles divers…).

Les profondeurs et les temps de plongée sont par ailleurs limités en fonction des gaz et mélanges gazeux respiratoires utilisés (cf chapitre 2.3 « Les gaz et mélanges respiratoires : présentation, intérêts et limites »).

2.4.3 Recycleur

2.4.3.1 Définition et principe de fonctionnement

Les recycleurs sont des équipements autonomes pour le travail hyperbare qui récupèrent les gaz expirés pour les réutiliser ; ils éliminent le CO_2 produit et compensent l'oxygène consommé par la respiration cellulaire. L'objectif de l'utilisation de cet appareil est d'éviter le gaspillage de gaz pour accroitre l'autonomie du travail en milieu hyperbare et limiter la taille des bouteilles.

2.4.3.2 Principes communs à tous les recycleurs

Les recycleurs sont tous constitués d'une boucle respiratoire qui comprend la pièce buccale, des tuyaux annelés, les sacs respiratoires (inspiratoire et expiratoire) et la cartouche de chaux sodée. Un système d'alimentation permet de remplacer l'oxygène consommé par le plongeur. Le CO_2 est éliminé du gaz expiré en passant à travers une cartouche remplie de chaux sodée selon une réaction chimique qui produit de la chaleur et de la vapeur d'eau.

Tous les modèles existants se composent des éléments essentiels que sont les sacs respiratoires, la cartouche épuratrice de dioxyde de carbone et la bouteille d'oxygène comprimé. Leur disposition et leur importance peuvent cependant varier, permettant des plongées de durées variables (30 minutes à 6 heures) ; et la manière dont le plongeur est relié à son appareil peut également être différente (embout buccal ou masque facial).

Il existe différents dispositifs de distribution de l'oxygène, de la simple admission à la demande, ou par débit continu préréglé par un débitmètre massique ou enfin par une vanne manuelle (type by-pass) qui vont permettre de différencier des « types » de recycleurs.

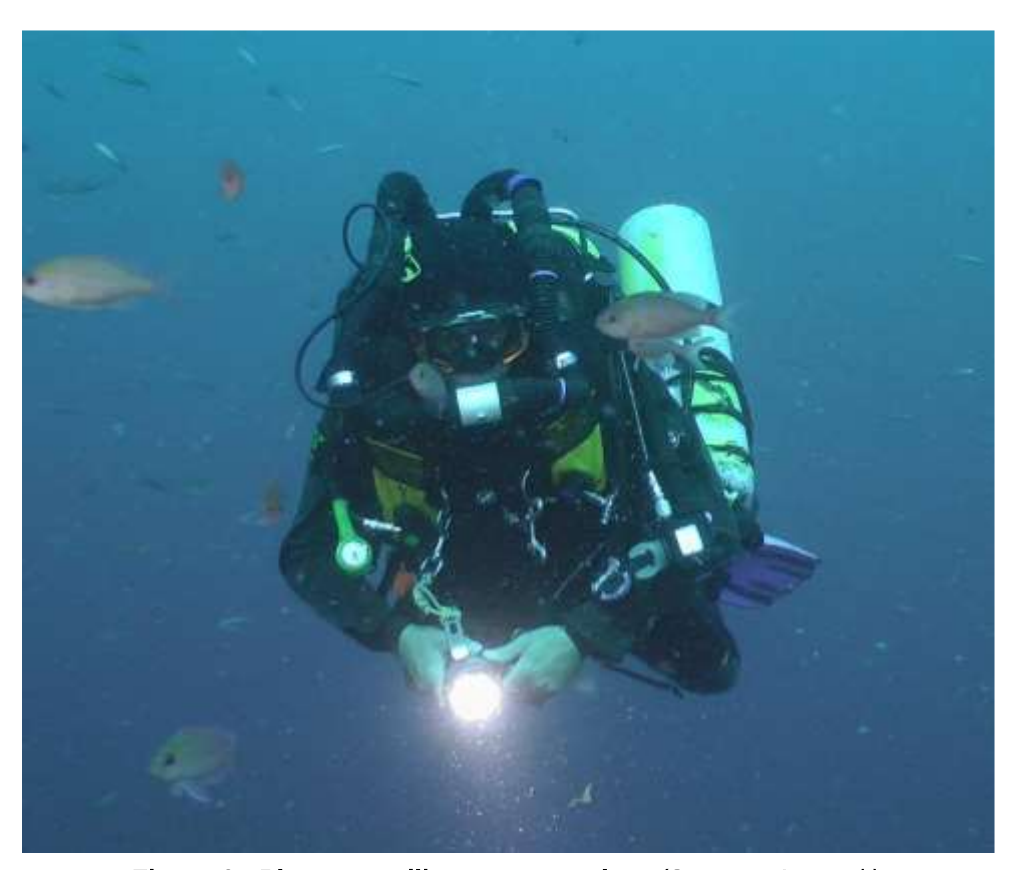


Figure 6 : Plongeur utilisant un recycleur *(Source : Aquatek)*

2.4.3.3 Les différents types de recycleur

On distingue différents types de recycleurs : les appareils à recyclage complet des gaz (recycleurs en circuit fermé – CCR) et les appareils à recyclage partiel des gaz (recycleurs semi-fermés – SCR).

Appareils respiratoires à recyclage COMPLET de gaz (Recycleurs en circuit fermé)

Ces appareils utilisent pour le renouvellement du mélange gazeux inspiré soit l'oxygène pur, soit un mélange respiratoire reconstitué à partir d'oxygène et d'un diluant : si le diluant est l'air, le mélange respiré sera du Nitrox et si le diluant est du Nitrhéliox, le mélange respiré sera également du Nitrhéliox. Ces recycleurs ne produisent pas de bulles, sauf à la remontée.

❖ ***Appareil respiratoire à recyclage complet d'oxygène pur***

Ce sont des recycleurs de conception et d'entretien très simples. Ils n'utilisent qu'un seul gaz, l'oxygène pur, pour remplacer la quantité d'oxygène consommée par le plongeur, et ne comportent qu'un seul sac respiratoire (ex de machines : FROGS).

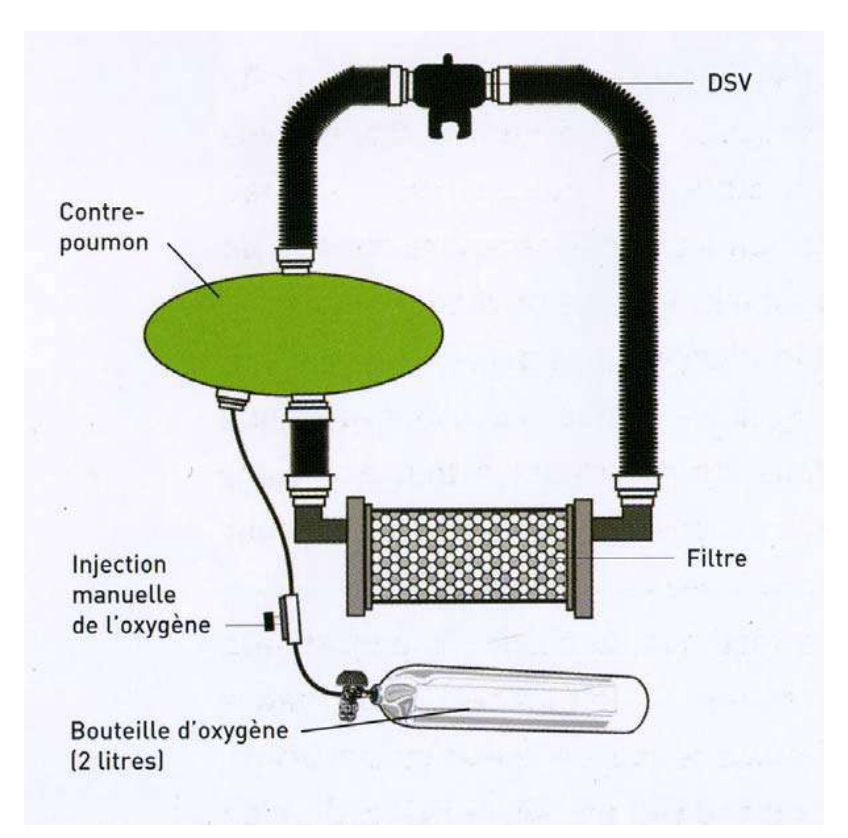


Figure 7 : Principe de fonctionnement d'un recycleur d'oxygène pur en circuit fermé *(Source : Gilles Saragoni, CNRS)*

En raison de l'utilisation d'oxygène pur, leur profondeur de mise en œuvre est limitée à 6 mètres et ce type d'appareil a été longtemps réservé à une utilisation dans un cadre militaire.

❖ *Appareil respiratoire à recyclage complet de mélanges suroxygénés*

Ces appareils sont équipés de deux bouteilles : la première contient de l'oxygène pur, et la seconde un diluant air, Nitrhéliox normoxique ou hypoxique selon la profondeur d'évolution souhaitée. Leur originalité tient au fait que la PpO_2 reste constante quelle que soit la profondeur. Ils utilisent l'injection de gaz diluant afin de compenser les variations de volume dans le sac inspiratoire. En fonction du mode d'injection de l'oxygène dans le sac inspiratoire, on distingue les recycleurs à régulation électronique et les recycleurs à régulation mécanique (manuelle) (ex de machines : rEvo…).

- *Les recycleurs à régulation <u>mécanique</u> de la PpO_2* avec bouteilles d'oxygène et de diluant (Air-Héliox-Nitrhéliox) : c'est le plongeur lui-même qui ajoute la quantité d'oxygène consommé. Le plongeur doit donc connaître en permanence sa PpO_2. Ces recycleurs sont de fonctionnement simple, moins chers à l'achat et à l'entretien. L'électronique n'intervient que pour afficher la PpO_2, comme dans un recycleur SCR.

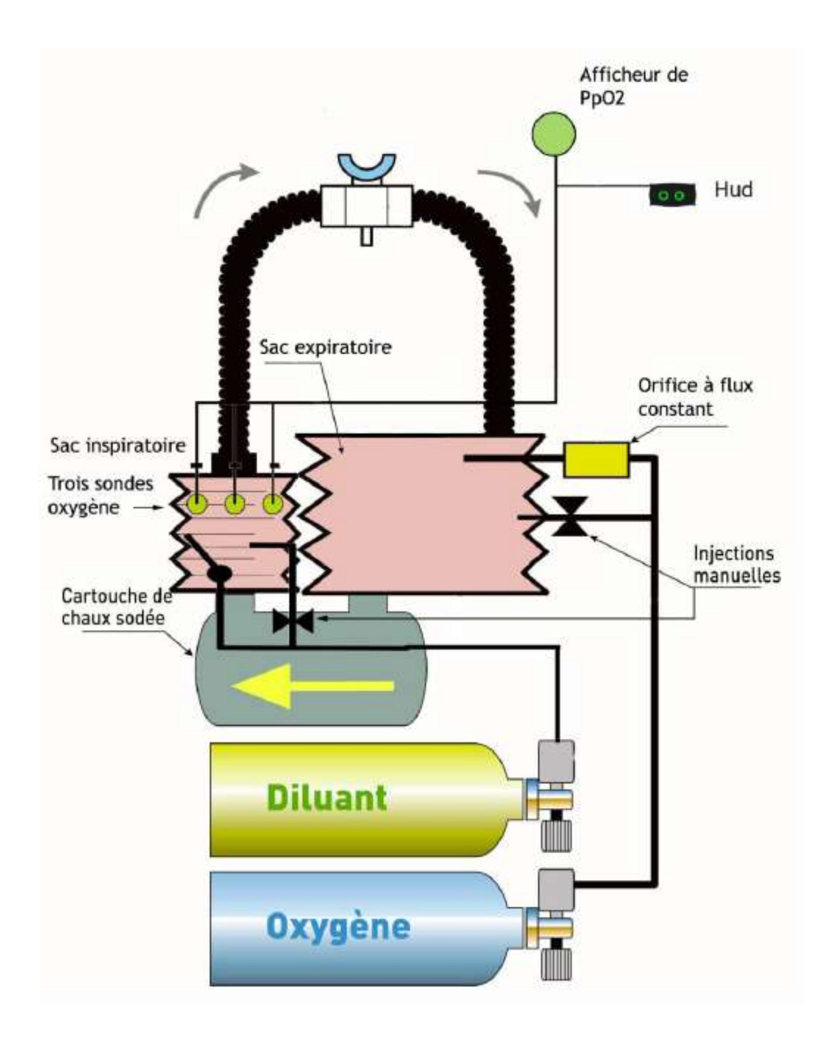


Figure 8 : Principe de fonctionnement d'un recycleur de mélanges suroxygénés en circuit fermé à régulation mécanique de la PpO_2 *(Source : Gilles Saragoni, CNRS)*

- *Les recycleurs à régulation* *<u>électronique</u>* *de la* PpO_2 avec bouteilles d'oxygène et de diluant (Air-Héliox-Nitrhéliox) : lorsque la PpO_2 dans le sac inspiratoire (ou faux-poumon) descend en dessous d'un seuil prédéfini (setpoint), un ajout d'oxygène, voire si nécessaire de diluant, est réalisé par l'intermédiaire d'un ordinateur qui comporte des capteurs à oxygène et gère l'injection des gaz. L'injection d'oxygène ou de diluant peut aussi être réalisée manuellement par le plongeur en cas de besoin (ex de machines : Inspiration et Evolution d'Ambient Pressure Diving, le Megalodon…).

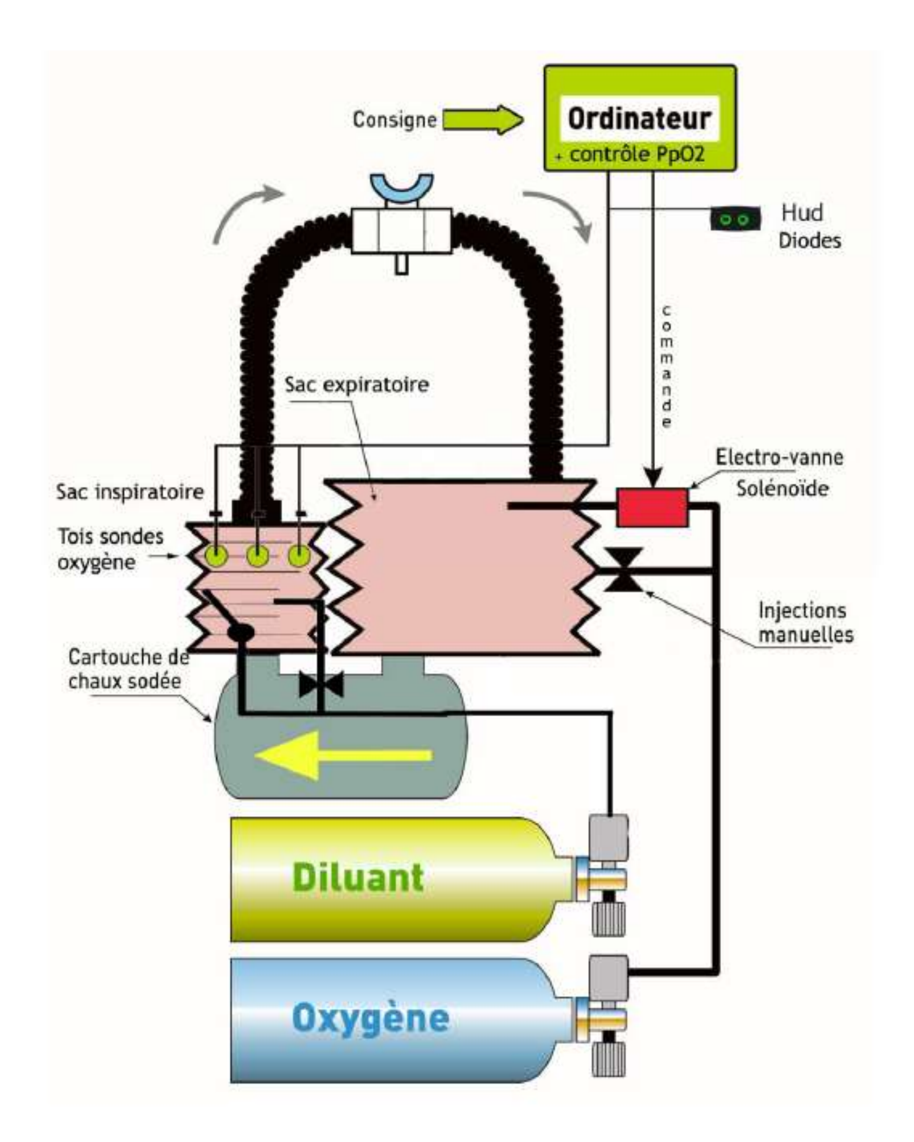


Figure 9 : Principe de fonctionnement d'un recycleur de mélanges suroxygénés en circuit fermé à régulation électronique de la PpO_2 *(Source : Gilles Saragoni, CNRS)*

<u>Appareils respiratoires à recyclage PARTIEL de mélanges suroxygénés (Recycleurs semi-fermés)</u>

Leur principe consiste à recycler un mélange respiratoire prédéfini en fonction de la profondeur d'évolution. L'oxygène consommé par le plongeur est fourni par ce mélange qui sera, selon le cas, un Nitrox ou un Nitrhéliox.

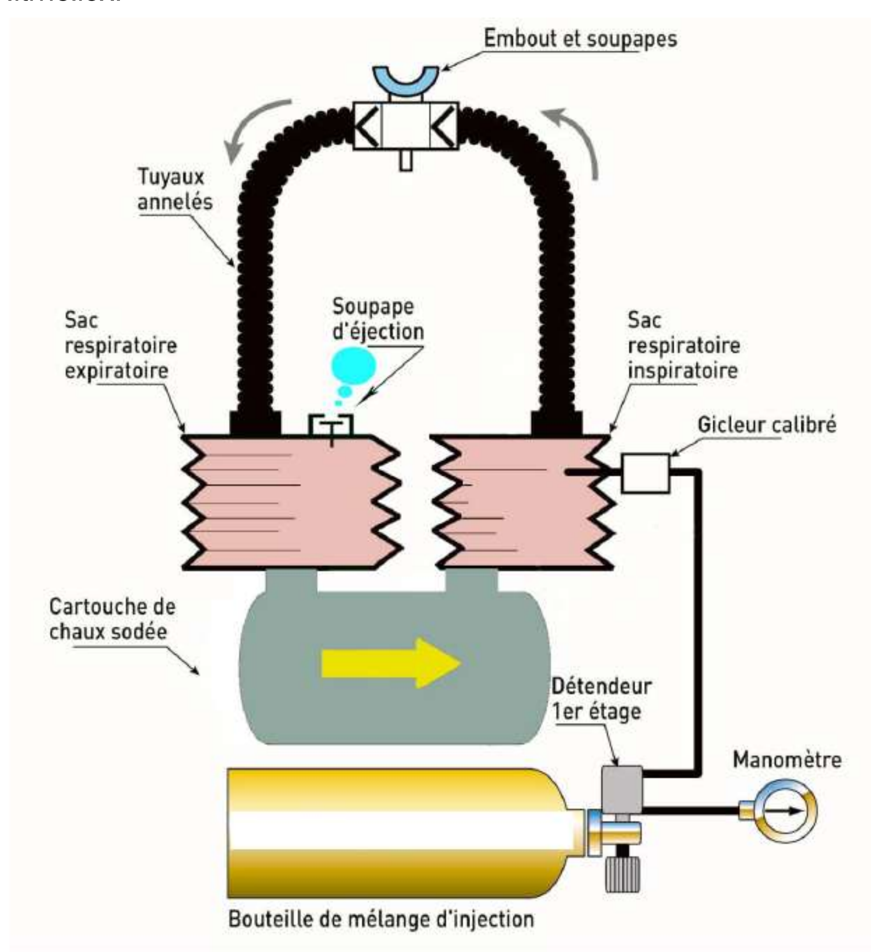


Figure 10 : Principe de fonctionnement d'un recycleur de mélanges suroxygénés semi-fermé
(Source : Gilles Saragoni, CNRS)

Selon le mode de remplacement de l'oxygène, on distingue plusieurs types de recycleurs semi-fermés :

- Les recycleurs mécaniques à renouvellement proportionnel qui possèdent un système de « contre-poumon » expulsant à chaque cycle ventilatoire une quantité de gaz pour admettre régulièrement du gaz frais et maintenir ainsi un pourcentage d'oxygène constant dans le sac ventilatoire, proportionnellement au pourcentage d'oxygène du mélange contenu dans la bouteille (ex de machines : DC55, CRABE…).
- Les recycleurs à gicleurs, avec injection à débit massique constant d'un mélange préétabli (ex de machines : Drâger Dolphin, Submatix..).
- Les recycleurs à buse avec injection réglable d'un mélange préétabli, nécessitant un moyen de contrôle de la PpO_2.

2.4.3.4 Le système de secours ou « Bail-Out »

C'est un système qui comporte une ou plusieurs bouteilles équipées de détendeurs. Ce système doit permettre au travailleur de respirer en circuit ouvert lorsqu'il rencontre un problème avec son recycleur. Le Bail-Out peut être intégré à la machine ou en être indépendant. Dans tous les cas, la profondeur d'évolution et les paliers nécessaires déterminent la quantité de gaz et de blocs embarquée.

Dans certains recycleurs, un dispositif appelé BOV (Bail-Out Valve) intègre le deuxième étage du détendeur de secours directement dans l'embout du recycleur. Le plongeur peut ainsi utiliser le Bail-Out en gardant l'embout en bouche.

2.4.3.5 Profil d'utilisation

Il n'y a aucune limitation de profondeur liée à l'utilisation du recycleur. L'autonomie est dépendante de la cartouche de chaux sodée (des spéléologues ont plongé jusqu'à 12 heures en autonomie) et de la procédure de décompression à utiliser pour le retour en surface.

La mise en œuvre de ce type d'appareil nécessite d'abord une formation particulière et, quelle que soit la mention (cf chapitre 2.6 « Secteurs d'activité concernés »), de mettre en place un manuel de sécurité d'utilisation des recycleurs clair précisant notamment le besoin d'une homogénéité du matériel utilisé par les plongeurs au sein d'une même entreprise. Le matériel doit être personnalisé pour limiter notamment les problèmes liés à l'hygiène, au nettoyage et au remplissage de la chaux sodée. Il faut spécifier les moyens de secours liés aux pannes de recycleurs, aux défaillances de l'ordinateur de plongée qui y est en général associé. Cette mesure est nécessaire pour les risques de panne et d'erreur humaine.

2.4.3.6 Intérêts

Intérêts généraux des appareils à recyclage de gaz :

Le recyclage du gaz expiré permet de faire une économie considérable en gaz respirés par rapport à la plongée en circuit ouvert.

Le temps de plongée est considérablement augmenté.

La réaction chimique d'élimination du CO_2 permet au plongeur de respirer un gaz humide et chaud, et limite ainsi ses pertes hydriques et caloriques en augmentant son confort, ces dernières pouvant représenter jusqu'à 25% des pertes caloriques totales en circuit ouvert.

La chaux sodée utilisée pour éliminer le gaz carbonique est d'une grande facilité d'emploi, d'une toxicité très limitée (risque d'ingestion caustique si l'appareil est victime d'une voie d'eau) et d'un coût peu élevé.

Ce sont des appareils plus silencieux qui offrent aux plongeurs la possibilité d'approcher la faune sous-marine de plus près qu'avec la plongée en circuit-ouvert. Par ailleurs, ils produisent peu ou pas de bulles et sont donc utiles pour réaliser des observations sous-marines, des photographies ou des approches discrètes dans le cas des nageurs de combats.

Intérêts spécifiques suivant le type de recycleur :

Appareil respiratoire à recyclage complet d'oxygène pur :

Ces appareils sont peu onéreux, très simples d'utilisation et d'entretien. Ils sont intéressants pour approcher la faune à faible profondeur. Ils présentent peu de danger si on ne dépasse pas 6 mètres de profondeur (1,6 bar de pression absolue).

Appareil respiratoire à recyclage complet de mélanges suroxygénés :

- Les *recycleurs à régulation électronique de la* PpO_2 présentent l'intérêt de fabriquer un mélange adapté à la profondeur d'utilisation avec une évolution possible à grande profondeur puisque ces appareils permettent d'éviter d'être équipé de nombreux blocs en plongée profonde. Leur utilisation est intéressante avec un ordinateur à gestion de gaz.
- Les *Recycleurs à régulation mécanique de la* PpO_2 ont été conçus pour palier certains risques potentiels des recycleurs à régulation électronique : dépendance à l'électronique qui peut se dérégler ou tomber en panne, coût d'entretien élevé et risque d'inattention du plongeur puisque l'électronique prend en charge la fabrication du mélange et la décompression. Ils offrent donc les mêmes intérêts que les recycleurs à régulation électronique avec en supplément, l'avantage de ne pas nécessiter de gestion électronique et donc d'être sujets à beaucoup moins de pannes, moins accidentogènes et plus faciles d'entretien. Ils sont par ailleurs un peu moins chers à l'achat.

Appareil respiratoire à recyclage partiel de mélanges suroxygénés

Ces appareils sont simples, plutôt faciles à utiliser, leur entretien est aisé et la maintenance peu onéreuse. L'utilisateur va pouvoir facilement s'adapter aux différents modèles d'appareils disponibles suivant ce mode de fonctionnement. Ces appareils sont peu dangereux à condition de respecter les recommandations du fabricant et constituent une bonne machine pour débuter en recycleur.

2.4.3.7 Limites

Limites générales des appareils à recyclage de gaz :

Actuellement, le principal point faible dans la conception du recycleur est défini par les cellules oxygène, très fragiles. Les cellules oxygène sont en effet distribuées par le constructeur sans avoir encore atteint un niveau de fiabilité totalement satisfaisant.

Ce sont également des appareils lourds et plus ou moins encombrants.

Les principaux risques sanitaires liés à l'utilisation des recycleurs sont l'hypoxie, l'hyperoxie et l'hypercapnie (liée à un problème avec la chaux sodée qui capte le CO_2) ; elles entrainent une perte de connaissance et une perte des facultés cognitives très rapides (en moins de 10 minutes).

La chaux sodée perd progressivement son efficacité, et doit être changée régulièrement. Par ailleurs, elle est moins performante en profondeur et en eau froide car son pouvoir de fixation de du CO_2 diminue. La plupart des fabricants recommande de ne pas utiliser la chaux en dessous de 4°C. Par ailleurs, l'absence de capteur de CO_2 fiable limite la possibilité d'autocontrôle.

Limites spécifiques suivant le type de recycleur :

Appareil respiratoire à recyclage complet d'oxygène pur

Peu répandu en pratique civile, la profondeur d'utilisation de ces appareils est limitée à 6 mètres et s'adresse donc à un public restreint. L'utilisation de ces appareils nécessite d'être attentif à la profondeur limite et à la durée d'exposition à l'oxygène pur.

Appareil respiratoire à recyclage complet de mélanges suroxygénés

- Les *recycleurs à régulation électronique de la* PpO_2 sont le type de recycleurs le plus souvent impliqué dans les accidents mortels. Leur composition présente notamment deux points délicats : le logiciel électronique de gestion et le solénoïde. Leur utilisation impose d'être vigilant car le travailleur risque de se « reposer » sur le logiciel électronique qui gère seul les paramètres de l'intervention (temps, gaz délivré, décompression…). Par ailleurs, le prix d'achat de ces appareils est élevé ainsi que l'entretien (remplacement des 3 cellules à oxygène tous

les ans). Il est nécessaire de recevoir une formation spécifique à l'utilisation de chaque machine.

- L'utilisation des *recycleurs à régulation mécanique de la* PpO_2 nécessite l'injection manuelle des gaz avec un risque de confusion entre l'injecteur d'oxygène et de diluant. Les cellules oxygène doivent obligatoirement être remplacées une fois par an. De la même manière que pour les recycleurs à régulation électronique, une formation est spécifique à chaque machine.

Appareil respiratoire à recyclage partiel de mélanges suroxygénés

L'utilisation de ce modèle de recycleur limite la profondeur d'intervention en fonction de la pression partielle d'oxygène, le plus généralement à 40 m (militaires). Par ailleurs, l'intérêt économique de l'utilisation de ces appareils est menacé puisque beaucoup de modèles bon marché ne se fabriquent plus et vont progressivement disparaître, les modèles restant ayant un prix comparable à celui d'un recycleur en circuit fermé.

2.4.4 Chambre hyperbare

2.4.4.1 Définition et principe de fonctionnement

Une chambre hyperbare (également appelée caisson de recompression) est une enceinte étanche capable d'accueillir une ou plusieurs personnes, et qu'il est possible de pressuriser afin d'exposer ses occupants à une pression absolue supérieure à la pression atmosphérique à des fins thérapeutiques.

Ce type d'installation est utilisé pour le traitement de différentes maladies et en particulier, la prise en charge des accidents de désaturation ou barotraumatismes susceptibles d'affecter les travailleurs exposés aux conditions hyperbares. En plus d'être placés dans un environnement pressurisé, les occupants reçoivent un gaz ou mélange respiratoire dont l'alimentation est pilotée depuis l'extérieur du caisson. Les gaz respirables qu'il est possible d'utiliser dans une chambre hyperbare sont l'air comprimé, l'oxygène et les mélanges suroxygénés.

Il existe 2 types de chambres hyperbares :

- Les chambres hyperbares monoplaces qui disposent d'un compartiment unique et ne peuvent recevoir qu'un seul patient (aucun accès au patient n'est possible en cours de traitement). Ces chambres sont mises en pression à l'air et le masque facial est alimenté en oxygène pur. L'usage de ces dispositifs est strictement règlementé en France.
- Les chambres multiplaces qui disposent de 2 compartiments ou plus permettant l'accès de personnel, patient ou matériel en cours de traitement. Elles sont capables d'accueillir 2 personnes ou plus. Les patients respirent l'oxygène pur ou les mélanges suroxygénés de façon intermittente à l'aide de masques faciaux individuels, tandis que le personnel accompagnant respire l'air ambiant ou un mélange de décompression (avec possibilité de respirer également de l'oxygène au masque).

2.4.4.2 Profil d'utilisation

Suivant les circonstances de mise en œuvre des chambres hyperbares, il est nécessaire de faire la distinction entre :

- **Les caissons hyperbares thérapeutiques**, utilisés à l'hôpital dans les centres hyperbares. La France (métropolitaine et outre-mer) compte 23 centres hyperbares civils, militaires, publics ou privés.

La chambre hyperbare est pilotée par un personnel spécialisé ou un technicien/opérateur hyperbare depuis le tableau général de commande, situé à l'extérieur. Ce tableau permet de suivre et de contrôler en temps réel les paramètres de traitement et les paramètres de surveillance physiologique.

La pression dans la chambre est augmentée progressivement grâce à l'admission d'air comprimé produit par un compresseur au niveau de l'établissement de santé ou mis à disposition par le fournisseur. Cet air doit satisfaire le niveau de qualité « Air médical », définit par la norme EN 12021. A l'inverse, à l'issue d'une séance de traitement, l'échappement de gaz permet la décompression de l'enceinte.



Figure 11 : Caissons hyperbares thérapeutiques *(Source : Mathieu Coulange)*

Les gaz respiratoires administrés aux patients doivent satisfaire aux exigences de qualité définies par la Pharmacopée Européenne ou *a minima*, être en conformité avec les standards définis pour les gaz utilisés lors des interventions professionnelles en conditions hyperbares, en tenant compte de la toxicité liée aux variations des pressions partielles de ces gaz.

Les chambres thérapeutiques hyperbares permettent l'administration aux patients de thérapies hyperbares. L'oxygénothérapie hyperbare (OHB) consiste à faire inhaler au patient de l'oxygène à une pression supérieure à la pression atmosphérique. Le patient est installé dans une chambre hyperbare appelée communément caisson.

La Haute Autorité de Santé a validé en 2007 une série d'indications de l'oxygénothérapie hyperbare en précisant les modalités d'exécution et la place dans la stratégie thérapeutique. L'oxygénothérapie hyperbare est ainsi préconisée lors de la prise en charge en urgence des intoxications au monoxyde de carbone, des ADD (traitement initial et des déficits résiduels) et des embolies gazeuses. Elle est également indiquée dans la prise en charge de certaines pathologies chroniques comme l'ostéomyélite chronique réfractaire, les lésions radio-induites ou certains cas d'ulcères ou gangrènes ischémiques, notamment chez des patients diabétiques.

Pour administrer ces traitements aux patients, on utilise des chambres thérapeutiques (multiplaces pour permettre un accompagnement par du personnel qualifié) pressurisées à l'air médical, dans lesquelles le patient respire de l'oxygène pur ou des mélanges suroxygénés.



Figure 12 : Intérieur d'une chambre hyperbare thérapeutique multiplace *(Source : Mathieu Coulange)*

Une séance d'oxygénothérapie hyperbare standard durant en moyenne 90 minutes se déroule classiquement en 3 phases :

- Une première phase de compression lente (environ 1 mètre par minute), qui correspond à la mise en pression du caisson et au cours de laquelle le patient respire l'air ambiant ;
- Un palier à pression constante au cours duquel le malade respire de l'oxygène pur ou des mélanges suroxygénés *via* un masque individuel. La pression appliquée et la durée du palier sont variables selon les indications thérapeutiques (usuellement une pression absolue de 2,5 bars). Le personnel accompagnant subit donc également la même pression, mais respire en air ambiant ;
- Une troisième phase de décompression lente, au cours de laquelle les patients restent sous masque à respirer de l'oxygène ou des mélanges suroxygénés. Cette phase peut être entrecoupée par les paliers de décompression nécessaires.

➢ **Les caissons de recompression de chantier**, de taille plus petite, obligatoires sur certains sites lors des interventions des travailleurs en conditions hyperbares (Marine Nationale, travaux subaquatiques, tunneliers, expéditions scientifiques…) pour permettre de réaliser des recompressions de rattrapage ou de sauvegarde.

Les caissons de recompression permettent aux travailleurs de faire des décompressions de surface à l'oxygène ou de recevoir une oxygénothérapie hyperbare (en cas d'accident) directement sur le lieu du chantier. La délivrance de l'oxygène hyperbare est gérée par un médecin spécialisé voire un opérateur de caisson qualifié, en l'absence de médecin sur site.

La mise en place d'un caisson de recompression sur site est nécessaire à partir du moment où les expositions hyperbares impliquent la réalisation de paliers, et que la localisation du centre hyperbare le plus proche risque d'entrainer un délai thérapeutique trop important. Le caisson peut être utilisé en l'absence de signes cliniques, suite à une erreur de procédure (remontée trop rapide par exemple) pour réaliser une recompression de rattrapage. Il permet également une prise en charge immédiate des travailleurs présentant des symptômes d'accidents de désaturation ou de barotraumatismes nécessitant la réalisation d'un protocole de recompression d'urgence, en attendant l'arrivée du médecin. Le traitement hyperbare ne peut être débuté qu'après un avis médical. Le travailleur accidenté doit être ensuite pris en charge dans un centre spécialisé (centre hyperbare).



Figure 13 : Caisson de recompression mobile *(Source : Mathieu Coulange)*

2.4.4.3 Intérêts

Les chambres hyperbares permettent le traitement des ADD et des surpressions pulmonaires avec signes neurologiques ou coronariens chez les plongeurs (loisir et professionnels) et les personnels travaillant en conditions hyperbares sèches (tunneliers, personnel médical et paramédical des caissons).

L'inhalation d'oxygène en conditions hyperbares entraîne une diminution de la taille des bulles de gaz pathogènes et une augmentation de l'oxygène dissous. L'administration d'oxygène hyperbare permet de traiter plus efficacement l'embolie gazeuse et les ADD grâce à une compression des volumes gazeux. L'OHB en urgence est fortement recommandée dans le traitement des ADD car elle agit positivement sur le pronostic vital du patient.

Par ailleurs, la présence d'un caisson de recompression à proximité immédiate du lieu des interventions en conditions hyperbares (Marine Nationale, travaux subaquatiques, tunneliers, expéditions scientifiques…) permet une prise en charge rapide des travailleurs victimes d'un ADD ou de barotraumatismes. Ces accidents mettent en jeu le pronostic vital et peuvent être à l'origine de graves séquelles fonctionnelles. Toutefois, suivant chaque type d'accident, une évaluation du rapport bénéfice risque entre une recompression sur site immédiate dans un caisson de chantier versus une recompression dans une chambre de réanimation hyperbare hospitalière doit être réalisée systématiquement lors de l'établissement du document unique, dans le chapitre de la sécurité du travailleur sur le lieu du chantier.

2.4.4.4 Limites

Les patients traités en caisson ainsi que le personnel accompagnant encourent un risque d'accident barotraumatique (oto-rhino-laryngologique (ORL), pulmonaire…) lors des phases de mise en pression et de décompression du caisson.

La décompression expose également les occupants du caisson (patients et accompagnants) à un risque d'accident de désaturation et doit être réalisée dans le respect strict des procédures dictées par les tables de décompression.

Les travailleurs amenés à suivre une oxygénothérapie hyperbare (recompression de rattrapage ou d'urgence) sont exposés aux risques spécifiques liés à la toxicité de l'oxygène (neurologique et pulmonaire). L'OHB présente des contre-indications : personnes asthmatiques ou atteintes de certains troubles ORL, cardiaques et neurologiques. Dans le cas de l'utilisation d'un caisson de recompression sur site, la mise en œuvre d'une OHB en l'absence de médecin spécialisé expose le travailleur à subir une recompression inappropriée pouvant notamment engager le pronostic vital dans le cas d'une surpression pulmonaire présentant un décollement de la plèvre (pneumothorax).

Par ailleurs, d'un point de vue technique, l'utilisation d'oxygène sous pression et à concentration élevée constitue un risque majeur d'incendie. Pour prévenir ces risques, des règles définissent la composition de l'atmosphère d'une chambre hyperbare et permettent de limiter l'enrichissement en oxygène de l'atmosphère du caisson (alimentation des patients via un inhalateur individuel étanche, dispositif d'évacuation des gaz rejetés à l'extérieur du caisson, analyseur d'oxygène à l'intérieur du caisson…). Ainsi, en hyperbarie, la pression partielle de l'oxygène dans une enceinte ne doit jamais être supérieure à 25% de la pression totale. Il est formellement conseillé de la maintenir en permanence à 21%. Il est également nécessaire par mesure de sécurité, de vérifier la compatibilité avec l'hyperbarie du matériel électrique ou électronique utilisé à l'intérieur de l'enceinte pressurisée.

2.4.5 Tunnelier et sas de tunnelier

2.4.5.1 Définition et principe de fonctionnement

Les tunneliers sont des machines de creusement des tunnels. Un tunnelier est classiquement constitué de 3 parties distinctes (Figure 14, Figure 15 et Figure 16) :

- La zone d'abattage, équipée soit d'une roue de coupe, soit d'un bras similaire à celui d'une pelle hydraulique, qui va creuser le tunnel en prenant appui sur les voussoirs déjà posés pour progresser ;
- La jupe, un cylindre qui assure le support du front de taille et protège les composants de la machine et les travailleurs avant la mise en place des voussoirs qui vont constituer les parois définitives du tunnel et en assurer la tenue et l'étanchéité ;
- Le train suiveur, constitué de remorques successives qui véhiculent les différents ateliers nécessaires à l'avancement du chantier (centre de pilotage, approvisionnement en matériaux, ventilation, alimentation électrique et centrale hydraulique, système d'évacuation des déblais…).

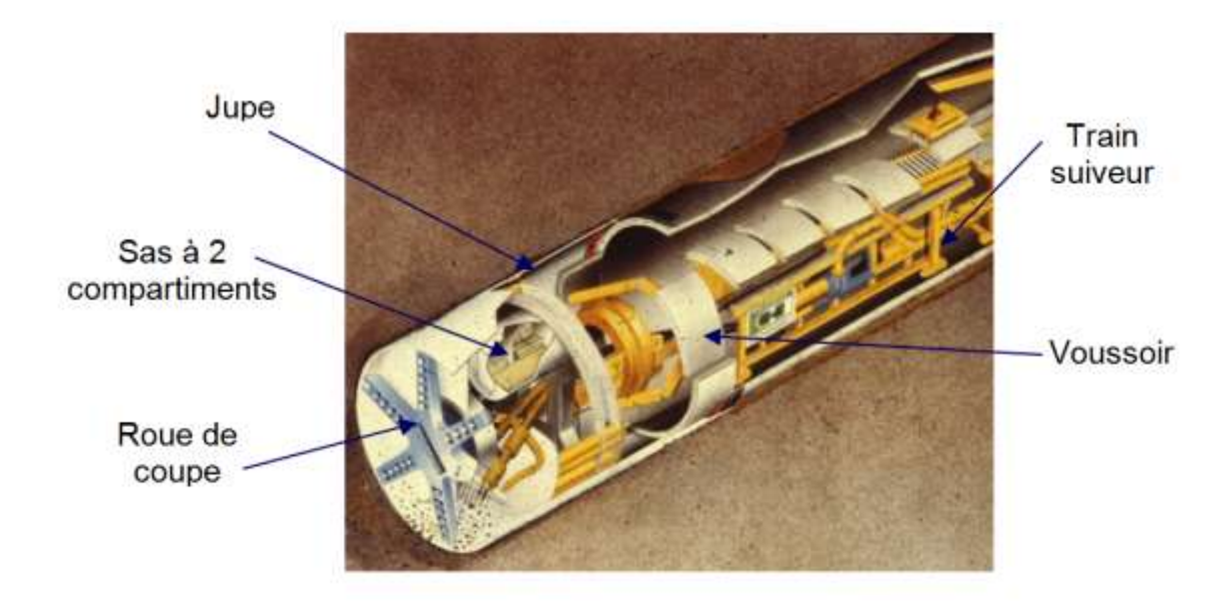


Figure 14 : Maquette de tunnelier à pression de boue

(*Source : Herrenknecht, tunneling systems*)

Parmi les tunneliers les plus couramment utilisés aujourd'hui, on distingue :

- les tunneliers à confinement d'air comprimé dans lesquels de l'air comprimé est utilisé pour contrer la pression hydrostatique exercée par l'eau du terrain et éviter que cette zone ne se remplisse par infiltration ;
- les tunneliers à pression de terre ou à pression de boue (mélange d'eau et d'argile appelé bentonite) ; dans ces tunneliers le creusement se fait sous confinement pâteux ou liquide, l'air comprimé n'est utilisé que lors de visites d'entretien ou de réparation de la roue de coupe afin de permettre l'accès du personnel.

Une cloison sépare la chambre d'excavation (ou d'abattage) pressurisée qui contient le bras d'abattage ou la roue de coupe, de la zone non pressurisée, renfermant les composants de la machine et les personnels. A l'avancement du tunnelier, des voussoirs préfabriqués sont installés ; ils constituent la paroi du tunnel.

Dans toutes ces configurations, un ou plusieurs sas servent à la pressurisation des personnels lors des interventions hyperbares.



Figure 15 : Tunnelier NFM technologies, Thalys - Diam. 15 mètres *(Source : NFM Technologies)*

Figure 16 : Tunnelier CSM Bessac à attaque ponctuelle sous air comprimé (Source : CSM Bessac)

2.4.5.2 Profil d'utilisation

Les tunneliers à confinement d'air comprimé sont particulièrement adaptés au forage dans des sols instables avec risque d'infiltration d'eau. Leur limite en diamètre les rend inutilisables pour les tunnels de plus de 5 mètres, ils sont surtout employés pour des tunnels techniques ou les égouts.

Les tunneliers à pression de terre ou de boue conviennent pour tous les diamètres (jusqu'à 18 mètres actuellement) et sont choisis (pression de terre ou de boue) notamment selon la nature du ou des terrains à traverser. Ils permettent de réaliser différents types d'ouvrages souterrains : des tunnels routiers de moyenne à forte importance, des tunnels ferroviaires, des galeries hydrauliques, des réseaux souterrains de transports en commun…

Initialement, pour la réalisation des travaux de creusement, la galerie était entièrement pressurisée. A l'heure actuelle, le creusement est fait dans une zone confinée à l'extrémité de la galerie ce qui permet à l'ensemble du personnel de travailler à pression atmosphérique derrière le bouclier (Figure 17).

Lorsque les conditions sont favorables, un tunnelier moderne creuse et construit la galerie en même temps à la cadence d'environ 15 à 20 mètres par jour.

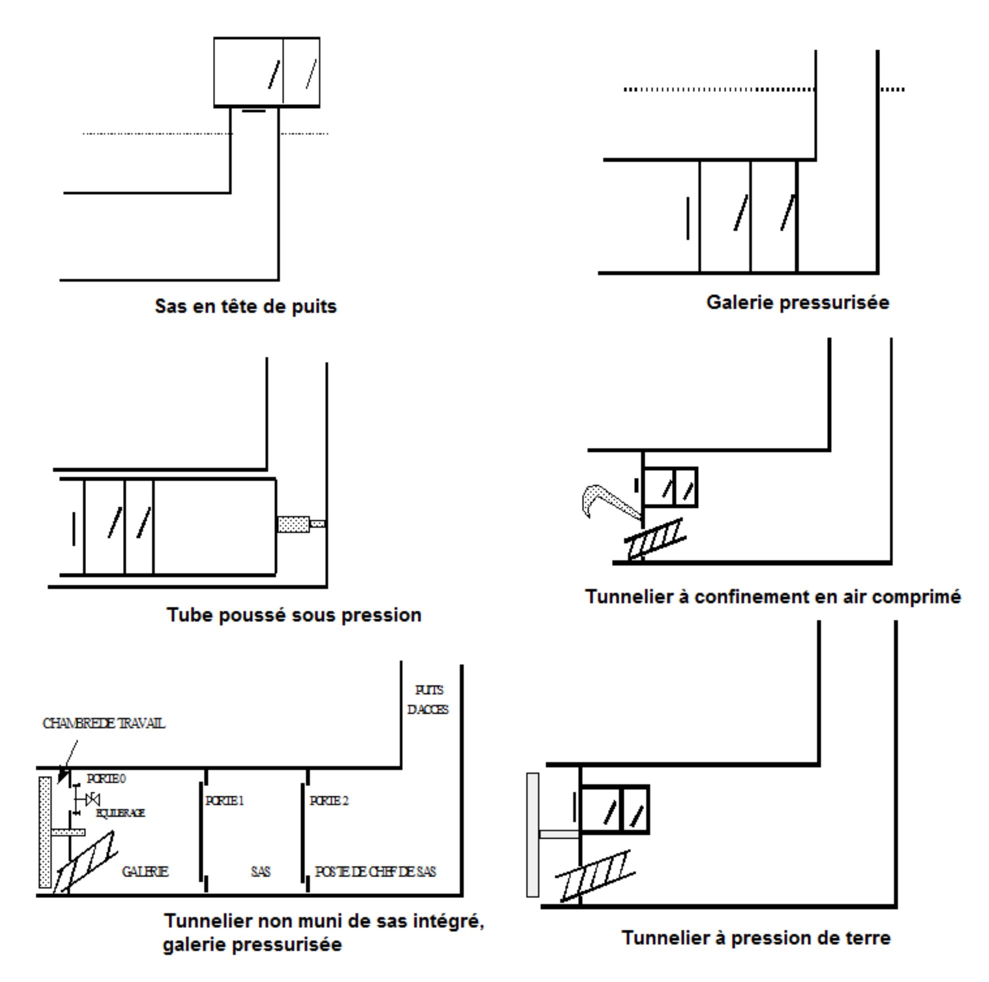


Figure 17 : Principe des travaux hyperbares en tunneliers
(Source : Jean-Claude Le Péchon)

Lorsque les éléments de creusement (roue ou fraise) nécessitent visite puis réparation, ou bien lorsque des blocs rocheux ou de l'argile ne peuvent être enlevés *via* les dispositifs d'extraction chargés de cette fonction, il y a lieu d'envoyer des hommes pour intervenir à l'avant de la machine dans la zone pressurisée en contact avec le terrain. La chambre d'abattage est alors dégagée du terrain déjà abattu ou de la boue, remplacés par de l'air à la pression du terrain. Le personnel nécessaire aux travaux (les hyperbaristes, habilités au travail en zone pressurisée) est comprimé dans un sas afin d'accéder à la chambre d'abattage pressurisée (Figure 18).



Figure 18 : Sas à 4 enceintes avant montage - Tech-Plus – NFM Technologies
(Source : Jean-Claude Le Péchon)

Une fois le temps prévu sous pression écoulé, ou lorsque le travail envisagé est terminé, l'équipe regagne le sas pour être décomprimée selon les tables spécifiques de la Mention D. A l'inverse de la compression contrôlée depuis l'intérieur du sas par un des hyperbaristes, la décompression est contrôlée de l'extérieur.

Un impératif de sécurité implique qu'à tout moment, il doit être possible de secourir les hyperbaristes au travail depuis la pression atmosphérique. Il convient donc de disposer d'un sas de secours, maintenu à la pression atmosphérique et permettant de pressuriser une ou plusieurs personnes pour le cas échéant, rejoindre les hyperbaristes au travail.

Les enceintes hyperbares sont donc au minimum de 3 :

- La chambre de travail, restant toujours sous pression (air, boue ou terrain);
- Un sas de compression, de repli et de décompression, restant toujours à la pression de travail pendant l'intervention hyperbare ;
- Un sas de secours, restant à la pression atmosphérique en conditions normales.

Afin de permettre des interventions hyperbares presque continues, certains tunneliers disposent de 2 systèmes de sas en parallèle. Ainsi, pendant qu'une équipe est en décompression, une seconde équipe peut continuer le travail. Ce n'est que lorsque les temps de décompression dépassent les temps d'interventions (vers 2,7 bars, lorsque la décompression est faite à l'oxygène) qu'intervient un temps mort d'attente jusqu'à ce qu'un sas soit libéré.

Les pressions d'intervention vont actuellement de 0,1 à 6,9 bar. Dans les tables officielles de la mention D, il existe des procédures de décompression à l'air ou avec des paliers à l'oxygène pur. Dès que la pression dépasse environ 2 bars, il est fortement recommandé de n'utiliser que les tables avec paliers à l'oxygène. Dans ce cas, toute une série de règles de sécurité sont à mettre en place : prévention de l'incendie dans le sas et à l'extérieur (lieu de stockage de l'oxygène), surveillance des intervenants pour tout signe d'intolérance à l'oxygène, respect des interruptions de la respiration d'oxygène par tranches de 5 minutes de respiration d'air ambiant toutes les 25 minutes…

A l'occasion de creusements beaucoup plus profonds, des pressions de l'ordre de 5 bars et plus ont été atteintes. Des mélanges contenant de l'hélium ont été utilisés et des dispositifs de transfert sous pression vers un habitat pressurisé ont été mis en œuvre, comme pour la plongée profonde.

Entre 2000 et 2002, une série de 7 saturations Trimix avec interventions au mélange ternaire a eu lieu aux Pays-Bas, donnant lieu à la réalisation de changements d'outils jusqu'à 6,9 bars. Pour mettre en pratique une telle technique il a fallu prévoir des installations spécifiques (Figure 19) :

- Un habitat de saturation pressurisé installé sur le chantier (mélange respiré : ternaire) ;
- Un train portant une navette pressurisée pour transférer le personnel de l'habitat vers le tunnelier (mélange ternaire respiré à l'aller et air au retour) ;
- Des dispositifs de manutention de la navette dans le tunnelier pour l'amener en position de connexion avec le sas d'accès vers la chambre d'abattage ainsi qu'avec le sas d'accès vers l'habitat de saturation ;
- Des masques respiratoires et le mélange ternaire respiré pour effectuer les travaux.

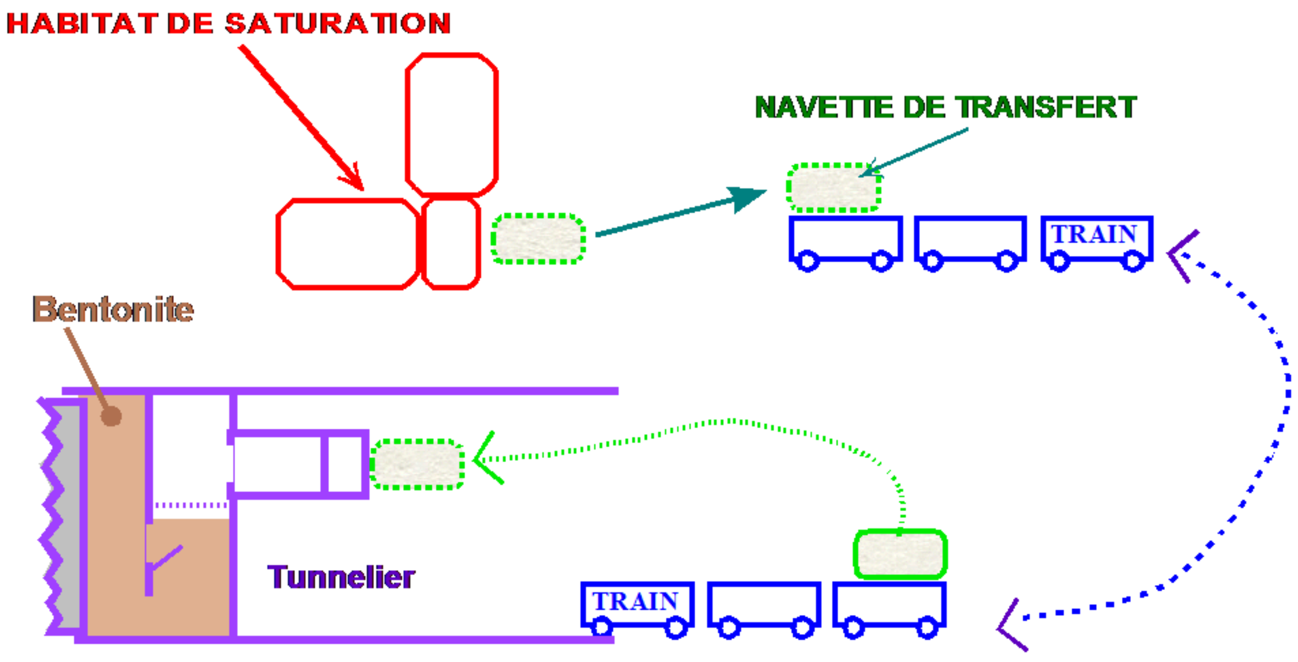


Figure 19 : Schéma de principe d'un chantier de tunnelier avec interventions hyperbares en saturation (Source : Jean-Claude Le Péchon)

En 2015 sont prévues, sur un chantier à Hong Kong, des interventions jusqu'à 6,5 bars qui auront lieu à partir d'une saturation Trimix, avec respiration de Trimix au masque pendant toute la phase de travaux dans la tête de coupe du tunnelier et d'air au cours des transferts. D'autres chantiers de saturation sont également en cours en Chine et en Turquie (Le Péchon, 2010 ; Le Péchon et Gourdon, 2010 ; Le Péchon et Sterk, 2001 ; Le Péchon *et al.*, 2001).

2.4.5.3 Intérêts

Le tunnelier est une machine très puissante, dont le pilotage est facile et précis. C'est un équipement qui s'adapte à tous types de terrains et dont l'utilisation permet un avancement journalier des travaux de creusement. Les machines sont conçues spécifiquement pour le creusement d'un tunnel donné, mais peuvent être réutilisées sur un chantier analogue.

Les tunneliers modernes limitent le volume pressurisé à une zone confinée à l'extrémité de la galerie et protègent ainsi l'ensemble du personnel travaillant sur le chantier d'une exposition aux conditions hyperbares, en dehors des hyperbaristes amenés à intervenir ponctuellement dans la chambre d'abattage.

Le fait que la phase de compression des hyperbaristes soit contrôlée depuis l'intérieur du sas permet de limiter le risque d'accidents barotraumatiques, en ajustant immédiatement et facilement la pression lorsque des problèmes d'oreilles se manifestent chez les travailleurs.

2.4.5.4 Limites

La limite d'utilisation de la machine est la pression maximale applicable suivant les règlementations nationales en vigueur relatives à l'utilisation d'air comprimé. En France, aucune limite de pression maximale n'est définie pour ce type d'interventions.

Les passages par les sas d'entrée et de sortie du tunnelier exposent les travailleurs aux risques d'accidents de désaturation et de barotraumatismes.

Les travailleurs évoluant dans l'espace d'abattage sont exposés aux risques hyperbares, mais également aux risques inhérent à une activité de « chantier » (chutes, électrocution, plaies

diverses, fractures…) nécessitant une évacuation de l'accidenté dans des conditions complexes puisque les dimensions de la chambre de travail, comme celles des sas d'accès sont très limitées.

Afin de prévenir les risques d'incendies, dans le sas de transfert, lorsque la décompression est conduite à l'oxygène, il faut limiter la concentration d'oxygène à 25 %. Dans la chambre d'abattage, la source d'incendie est liée aux travaux par points chauds (découpage arc-air, soudage et meulage). Un incendie dans la galerie pose un problème pour l'évacuation des personnes pressurisées (décompression obligatoire et longue…).

L'instabilité du terrain excavé peut également représenter un risque pour les travailleurs, obligeant la réalisation d'un travail en tunnelier immergé (bentonite).

Le terrain peut être source de pollution de l'atmosphère de la chambre d'abattage (méthane, kérosène, hydrogène sulfuré, résidu de déchets industriels divers…) ; des mesures de prévention spécifiques doivent alors être envisagées.

2.4.6 Dispositifs immergés

La plongée à partir de dispositifs immergés désigne des techniques d'intervention en conditions hyperbares pour lesquelles les travailleurs sont reliés à la surface via différents types de dispositifs.

2.4.6.1 La plongée en bulle

Il s'agit d'une méthode de plongée utilisant une structure immergée semi-ouverte dénommée « bulle ». La bulle est reliée à la surface par un câble porteur et comprend une zone à sec, alimentée en gaz respiratoire (air ou mélange) depuis la surface par un ombilical ou narguilé principal. Un ou plusieurs narguilés secondaires partent de la bulle.

Ce dispositif sert d'ascenseur pour transporter les opérateurs et constitue un abri pour le travailleur hyperbare au voisinage du lieu de travail et pendant la décompression. La bulle offre la possibilité d'utiliser l'oxygène pur aux paliers à partir de 12 mètres, réduisant et sécurisant la décompression. Pendant la phase d'immersion, les plongeurs sont reliés à la bulle par un narguilé.

Les interventions mettant en œuvre une bulle de plongée sont limitées à une profondeur maximale de 90 mètres. L'équipe de travail est renforcée afin d'assurer la mise à l'eau et la récupération de la bulle en sécurité (cf Arrêté procédure mention A du 30 octobre 2012 - Art. 28).

2.4.6.2 Les systèmes de plongée

Il s'agit de méthodes de plongée développées pour permettre le maintien et le transfert sous pression du personnel entre le chantier immergé et une installation hyperbare située en surface.

L'installation comprend essentiellement deux parties : une barge avec les équipements de surface (une ou plusieurs chambres hyperbares), et la tourelle qui sert de véhicule entre la surface et le chantier. La tourelle vient se clamper sur un caisson ; elle est reliée à la barge par un ombilical comprenant les circuits de communication et permettant l'alimentation en mélanges respiratoires, énergie électrique.

La méthode de plongée avec système est obligatoire dès lors que la pression relative de l'intervention excède 9000 hectopascals (90 mètres de profondeur) ou que la durée de la décompression est supérieure à deux cents minutes (cf Arrêté procédure mention A du 30 octobre 2012 - Art. 31). Néanmoins, cette technique peut être mise en œuvre pour des profondeurs moins importantes (à partir de 40 mètres dans le cas de travaux lourds et longs par exemple).

Les systèmes à saturation permettent aux plongeurs de vivre (travailler, manger, dormir, se laver…) dans le système pendant des périodes allant jusqu'à 6 semaines. Ces systèmes sont réservés à des chantiers profonds et de longue durée.

Leur utilisation peut également être envisagée pour des chantiers profonds en tunneliers. De tels systèmes sont déjà utilisés à l'étranger, souvent sous la responsabilité d'entreprises françaises. Une modification de la réglementation pourrait permettre l'utilisation de ces systèmes en France, notamment dans le cadre des travaux de construction du « Grand Paris ».

2.5 Apnée

2.5.1 Définition de l'apnée professionnelle

On entend par « apnée professionnelle », la méthode de plongée sans appareil respiratoire avec interruption volontaire et momentanée de la ventilation dans le but d'accomplir une tâche professionnelle. L'air des poumons n'est donc pas renouvelé et ce, de manière volontaire. L'absence de ventilation, ne signifie pas arrêt de la respiration puisque la consommation d'oxygène dans les cellules du corps continue ainsi que toutes les réactions métaboliques associées. Ainsi, lors d'une apnée, le sang de l'apnéiste contient de moins en moins d'oxygène et de plus en plus de gaz carbonique. La rupture de l'apnée est déclenchée par des mécanismes physiologiques réflexes.

La plongée en apnée est très différente de la plongée en scaphandre autonome. Dans la plongée au SCUBA, le plongeur ventile à l'aide d'un détendeur qui utilise l'air fourni par les bouteilles de plongée et abaisse la pression jusqu'à ce qu'elle soit égale à la pression ambiante. Les poumons du plongeur appareillé ne subissent pas d'écrasement, quelle que soit la profondeur à laquelle il se trouve.

A l'inverse, l'apnée fait appel exclusivement à la provision d'air emmagasiné dans les poumons en surface et, au cours de la plongée, le volume des poumons du plongeur diminue en application de la loi de Mariotte.

L'apnéiste n'est donc pas confronté aux mêmes effets sanitaires que lors d'une plongée en air avec bouteille, notamment le risque de surpression pulmonaire à la remontée due à la dilatation des gaz ou la narcose liée à l'azote. L'arrêt de la ventilation d'air expose l'apnéiste professionnel à certaines pathologies spécifiques telles que le risque de syncope hypoxique (perte de connaissance soudaine), principalement lié à la pratique d'une hyperventilation (répétitions d'inspirations et d'expirations forcées) avant immersion et pouvant entrainer une noyade en l'absence de secours.

La durée de l'apnée est variable suivant les individus et les conditions environnementales. Il est établi que le froid et l'effort physique (exercice musculaire) réduisent la durée de l'apnée, puisqu'ils mettent en jeu des mécanismes physiologiques consommateurs d'oxygène et producteurs de CO_2.

2.5.2 Profil de pratique

L'utilisation professionnelle de l'apnée demeure encore ponctuelle mais se multiplie dans divers secteurs professionnels :

- En aquaculture et ostréiculture, l'apnée se pratique pour le contrôle visuel de l'état des filets des cages d'élevage de poissons en mer et le ramassage des poissons morts ;
- Les pêcheurs professionnels de l'étang de Thau, assurent la cueillette de la palourde 5 heures par jour, entre 4 et 8 mètres de profondeur et ce, depuis plus de vingt ans ;
- Dans le domaine scientifique, l'apnée est mise en œuvre dans le cadre de la réalisation du suivi ichtyologique de la faune colonisant les récifs artificiels ou pour le prélèvement de matériel biologique vivant ou d'échantillons de sédiments par carottage ;
- Les métiers de l'audiovisuel sont également concernés ;
- Les techniciens de maintenance des aquariums sont amenés à intervenir en apnée lors des opérations de nettoyage des bassins ;
- Les plongeurs sapeurs-pompiers pratiquent parfois l'apnée pour réaliser des opérations de sauvetage entre 0 et 10 mètres ;
- Les encadrants professionnels de plongée loisir la pratiquent dans le cadre de l'enseignement et l'encadrement de l'apnée sportive.

L'apnée présente certaines commodités pour devenir un outil d'appoint intégré aux métiers de la mer. Tout autant que pour la plongée en scaphandre autonome, cette nouvelle approche du travail sous-marin doit intégrer la notion d'efforts physiques, propre à la réalisation d'une activité professionnelle sous l'eau et requiert la mise en place d'une méthode d'intervention codifiée. Une formation spécifique adaptée aux objectifs professionnels est également nécessaire, afin d'apprendre au travailleur à gérer l'effort physique, la flottabilité, la profondeur d'évolution, à organiser son travail en binôme et également à composer avec les paramètres environnementaux du milieu (courant, température de l'eau, visibilité…).

En mer comme en rivière ou en lac, la pratique de l'apnée requiert un minimum d'équipement et un maximum de préparation. L'apnéiste remplit ses poumons d'air en surface, sans forcer, puis il bloque sa respiration. En fin d'apnée, quelques mouvements respiratoires amples et profonds suivis de quelques minutes de repos lui permettent de récupérer.

L'équipement de base de l'apnéiste se compose d'une combinaison de plongée équipée d'une cagoule protégeant le cou du froid, d'un système de lestage pour vaincre la flottabilité (ceinture de plomb ou baudrier largables, plombs de chevilles…), une paire de palmes, un masque et un tuba, un couteau pour se libérer d'un éventuel obstacle au fond (filet, corde...) et une bouée signalant sa position.

2.5.3 Intérêts

L'atout principal de l'apnée réside dans sa souplesse d'utilisation. Il s'agit en effet d'une méthode d'intervention peu couteuse, facile et rapide à mettre en œuvre puisqu'elle nécessite une logistique légère. C'est ainsi une pratique adaptée pour des opérations immédiates de contrôle sous-marin ou pour une intervention de secours subaquatique.

L'absence de dégagement de bulles lors d'une plongée en apnée explique l'intérêt de son utilisation dans les secteurs de la plongée scientifique et de l'audiovisuel, puisqu'elle offre une excellente qualité d'observation comparativement aux appareils de plongée à circuit ouvert.

D'un point de vue sanitaire, comparativement à la plongée SCUBA, l'apnéiste n'est pas exposé au risque de narcose à l'azote (cf chapitre 3.3.3 « Effets sanitaires liés à la pratique de l'apnée »).

2.5.4 Limites

En cas de durée d'immersion prolongée, le travailleur souffre du froid et des contraintes cardiovasculaires. Par ailleurs, la répétition des incursions entraîne des risques sanitaires de type barotraumatiques, principalement ORL. L'apnéiste est également confronté aux risques neurologiques et de syncope spécifiques (samba) (cf chapitre 3.3.3 « Effets sanitaires liés à la pratique de l'apnée »).

Le travail en apnée est contraint par le fait que la durée de submersion est limitée. Les incursions sont donc limitées dans le temps, mais également en termes de profondeur car il faut que l'apnéiste professionnel dispose de suffisamment de temps pour accomplir sous l'eau la tâche qui lui incombe.

2.6 Secteurs d'activité concernés

Les travailleurs en conditions hyperbares peuvent intervenir en milieu immergé (scaphandriers, scientifiques, militaires, secours…) ou sans immersion (tubistes, personnel accompagnant des caissons…).

En France, pour travailler en conditions hyperbares, il faut être titulaire d'un certificat d'aptitude à l'hyperbarie (CAH) délivré par un organisme de formation agréé. Suivant la formation reçue, ces travailleurs ont accès à différents types d'activités professionnelles, définies par une « Mention ».

La Mention A concerne les travaux subaquatiques (activités de scaphandrier) : travaux maritimes, pétroliers, industriels, opérations de génie civil (Bâtiment et travaux publics (BTP)), *etc.*

La Mention B correspond à différents types d'interventions subaquatiques : les activités physiques ou sportives, l'archéologie sous-marine et subaquatique, les arts, spectacles et médias (photographes, cameramen, cadreurs, éclairagistes, acteurs, etc.), les cultures marines et aquaculture (aquaculteurs, marins-pêcheurs, corailleurs, ostréiculteurs, etc.), la défense, la pêche et récoltes subaquatiques, le secours et sécurité (policiers, douaniers, sécurité civile, pompiers, *etc.*).

La Mention C concerne les interventions sans immersion pour les personnels affectés à la mise en œuvre des installations hyperbares médicales (médecins, infirmiers, aides-soignants, techniciens, *etc.*) et regroupe des travailleurs intervenant dans les domaines civils et militaires.

La Mention D correspond aux travaux sans immersion effectués par les tubistes dans les tunneliers, par les soudeurs hyperbares, les agents des centrales nucléaires, les personnels de l'industrie aéronautique, *etc*.

Pour chaque CAH, les zones de pressions (profondeurs) auxquelles ont accès les travailleurs sont définies par la « Classe » : la Classe 0 pour travailler jusqu'à 1,2 bar de pression relative (12 mètres de profondeur), la Classe I pour travailler jusqu'à 3 bars de pression relative (30 mètres de profondeur), la Classe II pour travailler jusqu'à 5 bars de pressions relative (50 mètres de profondeur) et la Classe III pour travailler au-delà de 5 bars de pression relative (50 mètres de profondeur).

Les informations décrites dans ce chapitre proviennent essentiellement des entretiens réalisés auprès des professionnels des domaines d'activité concernés (cf Annexe 2).

2.6.1 Mention A

2.6.1.1 Caractérisation de la population professionnelle

Métiers représentés et répartition des effectifs

Les travailleurs relevant de la mention A sont des scaphandriers, affectés à la réalisation de travaux subaquatiques pour le compte d'entreprises soumises à certification. On recense en France environ 160 entreprises dites de « travaux immergés », dont seulement 80 auraient des activités continues dans ce domaine.

Actuellement, on dénombre 1500 travailleurs appartenant à la mention A, c'est à dire les travailleurs à jour sur la visite médicale ou qui possèdent un diplôme valide (certificat d'aptitude à l'hyperbarie de moins de 10 ans ou renouvelé dans les délais).

On distingue 2 grandes catégories de scaphandriers :

- **Les plongeurs du BTP ou « Inshore »**, généralement basés à terre et dont la zone privilégiée d'intervention se situe de 0 à 20 mètres de profondeur. Ces plongeurs appartiennent majoritairement à la mention A, classe II, ce qui signifie qu'ils peuvent intervenir jusqu'à une pression absolue maximale de 6 bars (profondeur équivalente de 50 mètres). Le nombre effectif de travailleurs représente actuellement environ 400 à 450 ETP (équivalent temps plein)

pour les entreprises métropolitaines répartis entre 200 contrats à durée indéterminée (CDI) et 250 intérimaires.

- **Les plongeurs « Offshore »**, basés sur des barges, navires ou plates-formes de forage et dont les profondeurs d'interventions peuvent atteindre les 200 mètres et même au-delà. Ces plongeurs appartiennent aux classes I, II et III (susceptibles d'intervenir jusqu'à une pression absolue supérieure à 6 bars pour ces derniers) et représentent une petite population de 30 à 50 personnes qui travaillent à l'étranger pour les industries pétrolières ou les filiales locales (Afrique de l'Ouest francophone) à un rythme d'intervention différent. Ces scaphandriers « off-shore » sont embauchés avec un minimum requis de 10 ans d'expérience. Aucune souveraineté nationale ne s'exerce dans ces zones de travail (eaux internationales), le fonctionnement réglementaire est donc au choix du maître d'ouvrage, le code du travail français ne s'appliquant plus (sauf si la compagnie est française et les contrats des plongeurs établis en France). Cette profession est plutôt attractive mais présente des contraintes de travail importantes (rotation des équipes tous les 45 jours, travail 7 jours sur 7, 12 heures par jour).

Age des travailleurs

D'après les résultats d'une enquête de l'OPPBTP datant de 2009-2010, les travailleurs ont une moyenne d'âge de 40 ans, avec un intervalle allant de 20-25 ans pour les plus jeunes jusqu'à 60-65 ans pour les plus âgés (OPPBTP 2012). La population est vieillissante car cette profession intéresse difficilement la population jeune, notamment parce qu'il s'agit d'un métier difficile impliquant de nombreuses contraintes (déplacements permanents et chantiers de durée variable).

Description de l'activité (type d'activité, fréquence d'intervention…)

Les activités des scaphandriers « Inshore » et « Offshore » sont comparables, ce sont principalement les profondeurs d'intervention et donc les méthodes de plongée qui diffèrent.

Le scaphandrier « Inshore » intervient sur des réseaux et des ouvrages immergés pour des opérations de construction, d'assemblage, de désassemblage, d'entretien et de démolition. En métropole, 80% des travaux sont situés à une profondeur entre 0 et 12 mètres. Le système de plongée privilégié est donc le narguilé (quasiment 100%). Il concerne les travaux subaquatiques de découpage, soudage, levage, construction, réparation, entretien, visite d'ouvrages en milieu maritime, fluvial, lacustre ou industriel (tous types de liquides en cuve par exemple).

Les interventions ont lieu pour la plupart dans les eaux intérieures (peu d'interventions maritimes) et sont organisées par des entreprises de taille importante. Les interventions en milieu maritime ont lieu sur la façade méditerranéenne pour la plupart, et sur la côte atlantique pour le reste. Les entreprises concernées sont de petites structures qui réalisent ces travaux de manière anecdotique, à la demande et pouvant poser des problèmes en termes de sécurité.

Les plongeurs « Offshore » plongent usuellement à des profondeurs de 200 à 350 mètres et vont donc utiliser des méthodes de plongée spécifiques : la plongée en bulle ou la plongée avec systèmes hyperbares (tourelle de plongée ou système à saturation). La réglementation française limite la plongée système à une profondeur maximale de 200 mètres (de par les tables publiées). Ce type de travaux n'est actuellement pas réalisé en France.

Les scaphandriers sont amenés à plonger dans de l'eau plus ou moins trouble, mais pas uniquement. De plus en plus de plongées ont par exemple lieu en stations d'épuration et compte tenu du niveau de contamination de l'eau, nécessitent l'utilisation par les travailleurs de casques spécifiques à double alimentation et de soupapes d'expiration à double étage.

Ils plongent également dans tous les liquides de l'agro-alimentaire ainsi que de la chimie (acides…). Les profondeurs d'intervention dans ces conditions sont faibles, de 6 à 12 mètres maximum. Des procédures spécifiques d'habillage des scaphandriers et des accompagnants en

surface sont alors nécessaires pour assurer leur sécurité. Ce sont des interventions ponctuelles de durée courte afin de pénaliser le moins possible l'activité industrielle concernée.

C'est une population très mobile, amenée à se déplacer de chantier en chantier puisque le travail est organisé principalement sur des chantiers ponctuels, d'une journée le plus souvent (d'après les auditions OPPBTP et SNETI, 2013).

Les scaphandriers sont censés plonger au rythme de 5 jours par semaine. Les salariés travaillent environ 225 jours par an, ce qui représente environ 180 à 225 plongées annuelles. Le travail est limité à 3 heures par homme, par jour, avec un maximum de 280 plongées annuelles autorisées. Les plongeurs intérimaires ne travaillent en moyenne que 24 jours sur l'année. Ils risquent de manquer d'entrainement ce qui pose des problèmes en matière de sécurité. Pour les extrêmes, certains n'auront aucun jour de travail dans l'année alors que d'autres vont travailler toute l'année (d'après les auditions OPPBTP et SNETI, 2013).

Pour les travailleurs intervenant entre 0 et 12 mètres (la majorité des chantiers), la durée d'intervention quotidienne est de 3 heures en moyenne, sur poste fixe. Les travailleurs intervenant plus profondément ont des durées de plongée plus courtes (respect des tables MT) (d'après les auditions OPPBTP et SNETI, 2013). Il y a également une diminution du temps de travail définie par la réglementation en fonction des conditions de plongée (température de l'eau, manutention d'appareils lourds, courant…).

Les travailleurs font en moyenne une carrière de 15 ans en lien notamment avec les contraintes de pénibilité du travail et de vie familiale. Après 5 années en moyenne, 90% des personnes formées quittent la profession faute de travail à temps plein ou quasi-plein. Certains font néanmoins des carrières pouvant aller jusqu'à 40 années (d'après les auditions OPPBTP et SNETI, 2013).

Formation du personnel

L'Institut national de la plongée professionnelle (INPP) forme environ 120 scaphandriers par an au CAH. Le CAH est un certificat de sécurité, autorisant les travailleurs à plonger sur un chantier de travaux immergés mais cela ne constitue pas une qualification. Ils ne sont donc pas employables en l'état puisque le projet professionnel n'est pas intégré dans la formation.

Actuellement en France, la formation des scaphandriers pour l'obtention du CAH dure 9 semaines et consiste à apprendre à être en sécurité pour eux et pour les autres dans l'eau, sur un chantier de travaux immergés. Ils suivent une formation sur les dangers, les procédures, les tables de plongée, les manipulations et l'organisation d'un chantier. L'entrée en CAH à l'INPP, se fait sous réserve d'avoir déjà en plongée sportive un niveau 3 ou un niveau 4 (correspondant à la pratique sportive de plongée à 40-50 mètres).

En Europe, les formations des scaphandriers durent 8 à 12 semaines (suivant les pré-requis demandés) et certaines ont une approche différente (par exemple la Belgique, qui dispense une formation reconnue en France) intégrant, en même temps que l'apprentissage de la plongée et du milieu aquatique, l'apprentissage du travail sous l'eau (chaud, froid, électricité…).

L'INPP s'est récemment recentrée sur les formations à destination de la mention A car c'est la mention dans laquelle il y a le plus de besoins et d'attente en termes de formation de personnel.

Des formations à la plongée avec systèmes et respiration d'Héliox sont également dispensées. Elles concernent environ 80 stagiaires par an, des travailleurs de la mention A, classe III. Les élèves ont une période de formation à l'air puis ils apprennent la plongée à saturation à l'Héliox.

Périodicité

Le CAH est valable 10 ans. Il est question dans la nouvelle réglementation de réduire cette durée à 5 ans, les travailleurs devront suivre 2 jours de remise à niveau sanctionnés par un examen. Un échec pourrait entrainer la perte du CAH et la nécessité de suivre une nouvelle formation.

Modalités de remise à niveau des personnels sur l'utilisation des matériels

La remise à niveau est continue, d'une part du fait des fabricants concernant les aspects techniques et d'autre part par le CPH (conseiller à la prévention hyperbare), plutôt concernant la veille réglementaire et l'évolution des bonnes pratiques.

Traçabilité des parcours

Les scaphandriers ont obligation de consigner dans un livret de plongée individuel tamponné par l'entreprise tous les paramètres propres à chacune de leurs plongées (environnementaux, matériels, procéduriers...). Mais dans la pratique, les travailleurs ne le remplissent pas ce qui induit une perte de la traçabilité des parcours.

Depuis les lois sur la pénibilité, l'employeur est tenu d'avoir la même approche et doit conserver une liste et un enregistrement de toutes les feuilles de plongée. Un jeu est communiqué à la Médecine du Travail.

2.6.1.2 Intervention et exécution de travaux en milieu hyperbare (D'après les auditions OPPBTP et SNETI, 2013)

Nature des gaz utilisés

L'air (surtout utilisé sur la tranche 0-12 mètres) et le Nitrox sont utilisés entre 0 et 50 mètres de profondeur par les travailleurs de la mention A, classe II.

Pour des profondeurs supérieures à 50 mètres, ce sont des travailleurs de la classe III qui plongent aux mélanges gazeux respiratoires autres que l'air, à l'Héliox principalement. Aucun chantier de travaux subaquatiques n'est actuellement réalisé à plus de 50 mètres de profondeur en France.

- **Air comprimé**

L'air est le gaz respiratoire le plus utilisé, puisque la majorité des travaux ont lieu entre 0 et 12 mètres de profondeur. L'intégralité de la population active des scaphandriers est donc concernée par son emploi, ce qui représente environ 400 personnes.

Son utilisation est limitée à 50 mètres de profondeur pour les travailleurs de la mention A.

- **Nitrox**

Le Nitrox est utilisé de manière anecdotique, du plus pauvre en oxygène (25% d'O_2 ; 75% de N_2) au plus riche (70% d'O_2 ; 30% de N_2) jusqu'à une profondeur 43 mètres (limite pratique d'utilisation). La population de scaphandriers concernés représenterait environ 50 personnes sur 400 ETP (d'après les auditions OPPBTP et SNETI, 2013).

- **Oxygène**

La respiration d'oxygène aux paliers pendant la décompression est possible, mais n'est pas une pratique particulièrement développée dans cette population. La limite d'utilisation de l'oxygène en eau est de 1,6 bar de pression absolue, soit 6 mètres de profondeur.

Parmi les travailleurs des entreprises de travaux sous-marins, environ 100 personnes seraient concernées par la réalisation de paliers à l'oxygène (d'après les auditions OPPBTP et SNETI, 2013).

Cette technique présente un risque si elle est mal manipulée, notamment concernant la mauvaise gestion possible de la PpO_2 et de sa toxicité potentielle.

➢ **Trimix**

Aucun travailleur de la mention A ne serait concerné en métropole par l'utilisation de Trimix puisqu'officiellement il n'existe pas de tables publiées.

Dans la pratique, la composition des mélanges Trimix utilisés varie du pourcentage le plus élevé en oxygène (18% d'O_2 ; 41% de N_2 ; 41% d'He) pour finir vers un pourcentage plus faible (10% d'O_2 ; 45% de N_2 ; 45% d'He ou 10% d'O_2 ; 30% de N_2 ; 60% d'He).

La profondeur d'utilisation est limitée à environ 180 mètres de profondeur (en lien avec le fait que la masse volumique d'un mélange respiratoire ne doit pas excéder 9 grammes par litre à la pression d'utilisation). Par ailleurs, théoriquement, au-delà de 150 mètres, les Héliox prennent forcément le relais car les Trimix ne présentent plus aucun avantage (dans la pratique, les Héliox prennent le relais dès 120 mètres) (d'après les auditions OPPBTP et SNETI, 2013).

➢ **Héliox**

Toute la gamme de mélange est possible, du plus faible au plus élevé pourcentage d'oxygène :

- Les Héliox constitués de 2% d'O_2 et 98% d'He permettent d'aller en plongée jusqu'à 350 mètres (en France, les tables de décompression pour la plongée à saturation ne sont pas publiées au-delà de 200 mètres mais il est possible d'intervenir à des profondeurs supérieures) ;
- Les Héliox constitués de 20% d'O_2 et 80% d'He sont équivalents à de l'air et ont donc la même plage d'utilisation (0 à 50 mètres) ;
- Les Héliox (ou les Nitrox) sont utilisés dans le traitement des accidents de décompression neurologiques sur des tables à 4 ATA (profondeur équivalente de 30 mètres) ou 6 ATA (profondeur équivalente de 50 mètres). Le pourcentage d'oxygène dans le mélange ventilé doit être le plus élevé possible, tout en évitant d'atteindre une PpO_2 supérieure à 2,8 bars.

En France, une vingtaine de travailleurs seraient concernés pour des plongées spécifiques au-delà de 50 mètres, jusqu'à 75 mètres en bulle et au-delà avec les systèmes de saturation. Son utilisation commence à partir de 30 mètres et s'étend jusqu'à 200 mètres. A l'étranger, des tables sont disponibles jusqu'à 450 mètres de profondeur (Norvège, Brésil,…) (d'après les auditions OPPBTP et SNETI, 2013).

Avantages de l'utilisation des mélanges respiratoires par rapport à l'air pour les travailleurs de la mention A

L'utilisation de Nitrox en mélange fond permet de diminuer les risques de narcose à l'azote et de diminuer les temps de paliers.

L'usage de l'Héliox et du Trimix apporte une diminution des désordres neurologiques liés à l'azote puisque ce sont des gaz beaucoup moins narcotiques que l'azote de l'air en plongée. Grâce à ces gaz, les travailleurs ont l'esprit plus clair, ils ont mieux conscience du travail qu'ils doivent réaliser et du milieu dans lequel ils évoluent. Compte tenu de la dangerosité et de la complexité des tâches qu'ils doivent exécuter en immersion, l'usage de ces gaz est une pratique plus sécuritaire.

Ces pratiques permettent de rendre les interventions plus confortables et moins stressantes. Il ne faut pas en effet négliger la part de stress importante inhérente à ces métiers puisque les scaphandriers sont confrontés à de nombreux facteurs extérieurs qu'ils ne maitrisent pas.

Limites de l'utilisation des mélanges respiratoires par rapport à l'air pour les travailleurs de la mention A

Les limites techniques de l'utilisation des mélanges respiratoires autres que l'air chez ces travailleurs concernent principalement l'hélium. En premier lieu, l'hélium est un gaz très onéreux. Par ailleurs, ce gaz a pour particularité de modifier la voix des scaphandriers. Son utilisation implique donc la mise en place d'un mode de communication particulier pour les échanges entre le

travailleur et la personne à l'autre bout du narguilé. L'hélium provoque également un effet de froid dans l'organisme de par sa faible densité et sa fluidité. Sachant que la première source de fatigue chez le scaphandrier est liée à la déperdition de chaleur, l'utilisation de l'hélium implique de mettre en place des réchauffeurs de gaz, que le scaphandrier porte une combinaison réchauffée par circulation d'eau chaude à l'intérieur et également un système de réchauffement du détendeur.

Type de tables de décompression/ Ordinateurs utilisés

Les tables utilisées sont celles publiées par le ministère du travail (tables MT).

Pour des travaux spécifiques, d'autres tables peuvent être utilisées dans la mesure où l'employeur l'a dûment justifié dans le manuel de sécurité hyperbarele choix de tables autres que les tables officielles.

Les ordinateurs de plongée ne sont pas utilisés pour la plongée au narguilé.

Mode de fabrication et modalités d'analyse des gaz

Les gaz peuvent être achetés directement prêts à l'emploi auprès d'un fournisseur ou ils peuvent aussi être fabriqués dans l'entreprise par des compresseurs en surface. Des analyseurs de gaz permettent de contrôler et éventuellement corriger les mélanges préparés. La difficulté est d'avoir des analyseurs de gaz bien étalonnés pour garantir la précision des résultats des tests et avoir des fiches de contrôle représentatives de la composition des gaz. La tendance est plutôt à la diminution de l'utilisation des compresseurs dans les entreprises qui privilégient l'utilisation directe de bouteilles de gaz et de mélanges déjà préparés.

Avant l'exposition des utilisateurs, les fabricants de gaz sont tenus de fournir une fiche d'analyse de gaz ainsi qu'une fiche d'analyse des polluants (CO, CO_2, humidité, équivalent méthane…), quelle que soit l'origine des gaz. Avant la mise en service des gaz, l'entreprise est tenue de faire une vérification et de remplir une deuxième fiche d'analyse.

Sur le chantier, l'employeur est tenu de vérifier les conditions d'utilisation des gaz, c'est-à-dire que les gaz utilisés sont appropriés aux activités prévues.

Pour garantir une traçabilité des contrôles, les fiches d'analyse de gaz sont conservées dans le dossier de chantier.

<u>**Méthodes d'intervention**</u>

- **Narguilé**

La technique standard de plongée est le narguilé, qu'il s'agisse d'un départ depuis la surface, d'une bulle de plongée ou d'une tourelle. Dans 98% des cas (qui concernent des interventions menées entre 0 et 12 mètres), les travailleurs respirent principalement de l'air atmosphérique comprimé. De manière générale, les plongeurs n'utilisent pas d'oxygène à la décompression avec le narguilé, mais ils peuvent être amenés ponctuellement (30 à 40% des plongées) à réaliser des paliers à l'oxygène sur certains chantiers particuliers. Plus rarement, les plongées ont lieu au Nitrox (air enrichi en oxygène), c'est par exemple le cas pour des interventions à 30 ou 40 mètres de profondeur sur les barrages (d'après les auditions OPPBTP et SNETI, 2013).

D'après l'audition du SNETI, l'utilisation du Trimix (ou mélange ternaire) est interdite par la réglementation de manière indirecte, en lien avec le texte de l'arrêté du 30 octobre 2012 concernant les seuils de taux d'oxygène imposés qui rendent l'usage des mélanges Trimix incompatible avec les tables françaises.

Le décret de 2011 restreint les travailleurs de la mention A à l'utilisation du narguilé. Si cette méthode d'intervention doit être privilégiée, dans certains cas, elle n'est pas possible à mettre en œuvre. La réglementation laisse une ouverture pour ces cas particuliers en précisant que l'autorisation de l'utilisation du SCUBA peut être accordée par l'inspecteur du travail à titre exceptionnel dans certaines conditions dûment justifiées : courant, profondeur, durée

d'intervention faible... Une fois la demande d'autorisation envoyée, l'inspection du travail a 15 jours pour donner son accord.

Avantages/inconvénients de la plongée au narguilé

Outre les avantages décrits dans le chapitre 2.4.2.3, pendant toute l'intervention au narguilé, un pneumomètre suit et enregistre la profondeur de la plongée, les autres paramètres sont aussi suivis et enregistrés en surface (gaz, pression de gaz, profondeurs, durées …). En cas d'incident au fond, les secours envoyés n'ont qu'à suivre le narguilé pour atteindre le scaphandrier en difficulté.

- **Scaphandre autonome (SCUBA)**

Depuis le 30 octobre 2012, l'utilisation du SCUBA est soumise à autorisation de l'inspecteur du travail pour les travailleurs de la mention A.

Des dispositions prévues par le Code du Travail permettent théoriquement l'obtention d'autorisations ponctuelles d'utilisation du scaphandre autonome dans certains cas précis mais ce dispositif semble mal fonctionner en pratique (d'après les auditions OPPBTP et SNETI, 2013).

- **Recycleur**

L'utilisation du recycleur n'a pas été prévue dans l'arrêté spécifique aux plongeurs de la mention A. Il pourrait être néanmoins une technique à envisager pour l'avenir dans cette mention.

- **Dispositifs immergés (bulles de plongée, systèmes de plongée…)**

Des bulles de plongée sont utilisées pour certains travaux. L'utilisation de ces techniques concerne environ 8 à 12 personnes par an pour des plongées au-delà de 50 mètres de profondeur. De 0 à 39 mètres, le gaz respiratoire utilisé est le Nitrox, de 39 à 42 mètres, il s'agit d'air comprimé (plage particulière) et au-delà de 42 mètres, il s'agit de Trimix, ou d'Héliox (d'après les auditions OPPBTP et SNETI, 2013).

Avantages de l'utilisation des dispositifs immergés

Les plongées profondes effectuées via des bulles ou des tourelles présentent l'avantage en matière de sécurité, de permettre des remontées d'urgence des travailleurs en cas de problème.

- **Apnée**

L'apnée ne concerne pas les travailleurs de cette mention, hormis lors de leur formation, pour tester l'aquaticité des futurs plongeurs professionnels.

Par ailleurs, la pratique de l'apnée n'a pas été prévue pour les travailleurs de la mention A dans le décret spécifique relatif aux travaux subaquatiques effectués en milieu hyperbare mention A.

Néanmoins, des chantiers en apnée existent de manière anecdotique dans le domaine des travaux publics. Officiellement il n'y en a aucun, mais certains chantiers se déroulent pourtant en apnée dans 1 à 2 mètres d'eau, notamment dans le cadre des opérations de grattage de bateaux dans les ports (chantiers par ailleurs interdits par la loi littoral pour des raisons de pollution).

Procédures d'intervention et procédures de secours

Les rôles et fonctions sont définis par la réglementation suivant les situations (normale, dégradée, secours). La déclinaison opérationnelle du texte est néanmoins complexe sur certains aspects.

Pour l'organisation d'un chantier de travaux publics, la réglementation exige que 3 personnes minimum soient présentes sur le chantier et que soient représentées les 5 fonctions suivantes, quelle que soit la situation (en situation normale de travail, en situation dégradée- en cas de problème de matériel - ou en situation de secours) :

- Scaphandrier fond (opérateur) ;
- Scaphandrier assistant en surface (aide opérateur), qui peut assurer la fonction de scaphandrier de secours en cas de problème ;
- Scaphandrier de secours ;
- Surveillant de plongée ;
- Chef des opérations hyperbares (COH).

Compte tenu des problèmes de disponibilité de personnel, il est possible pour les travailleurs de cumuler plusieurs fonctions sur le même chantier. La même personne peut donc être amenée à assurer plusieurs fonctions différentes sur un chantier dans la même journée et également d'un chantier à un autre.

Une personne supplémentaire (pas nécessairement un scaphandrier) peut être requise pour manipuler le narguilé selon la configuration du site.

Dans le cadre de la plongée bulle, l'équipe minimale requise est de 7 personnes.

<u>Maintenance et entretien du matériel</u>

Modalités de contrôle

Les modalités de contrôle des matériels sont celles préconisées par les fabricants et peuvent être adaptées au sein de la société suivant les retours d'expérience des utilisateurs. La maintenance du matériel est faite pour partie par les scaphandriers eux-mêmes mais également par les fabricants de matériel qui proposent d'ailleurs, dans le cadre de l'entreprise, des stages pour apprendre aux travailleurs à réparer et entretenir correctement leur matériel (notice technique, suivi des évolutions…).

Durée de vie des appareils

La durée de vie est très variable suivant les appareils considérés puisque certaines pièces se changent toutes les 25 heures d'utilisation (membranes des détendeurs, joints…), alors que les plus vieux caissons de recompression encore en service datent de 1975. D'une manière générale, la qualité du matériel n'est plus un obstacle.

EPI, casque, tenue, communication

Des réglementations encadrent les opérations de maintenance en surface et les opérations de maintenance sur les équipements de protection individuelle (EPI) du plongeur (casques, détendeurs,…).

La fréquence du contrôle des EPI dépend des équipements. Les contrôles peuvent être annuels voire beaucoup plus fréquents selon les cas. Les casques de plongée doivent par exemple être vérifiés à chaque plongée. Tout est codifié par la réglementation (tests fonctionnels préalables à l'utilisation).

Pour les bouteilles et les réservoirs, un contrôle visuel annuel ainsi qu'une requalification sont réalisés tous les 2 ans (tous les 5 ans dans le cas où la société compte parmi ses salariés des scaphandriers techniciens d'inspection visuelle, d'après l'arrêté sur les appareils en pression de juillet 2004).

Prophylaxie

Il n'existe aucune obligation réglementaire concernant la désinfection des EPI et du matériel dans le cadre de la mention A (des procédures sont en revanche bien définies dans le cadre de la mention C).

La tendance actuelle est à l'individualisation du matériel dans un but hygiénique (cagoules de protection…), mais cela reste dépendant des moyens financiers dont dispose l'entreprise. Suivant la taille des entreprises, le matériel ne sera donc pas nécessairement individuel et pourra être passé d'un travailleur à l'autre sans procédure précise de désinfection. Certaines entreprises désinfectent systématiquement les EPI collectifs dans des bains de Septivon®, mais il n'y a aucune procédure normée.

Traçabilité des contrôles

Le niveau d'exigences en termes de traçabilité dépend de chaque société. Beaucoup de sociétés commencent à être certifiées ISO 9001 et quelques unes sont également ISO 14001 et OHSAS 18001. Les procès verbaux de contrôle des matériels sont émis et de plus en plus réclamés par les clients.

2.6.1.3 Remarques de la profession

Formation des travailleurs

Une modernisation du contenu pédagogique de la formation à l'obtention du CAH est nécessaire, notamment sur l'apprentissage par les scaphandriers de la mise en place des équipements sur un chantier. En effet, pendant la formation, les élèves arrivent et s'entrainent sur des ateliers déjà mis en place, ils ne savent donc pas installer les équipements. Il manque donc l'aspect opérationnel dans la formation dispensée aux élèves, à savoir comment se passent les tâches sur le terrain de manière pratique, technique et relationnelle.

Concernant les pré-requis permettant d'accéder à une formation pour l'obtention du CAH, le SNETI et les entreprises de travaux sous-marins souhaiteraient que les élèves acceptés dans la formation aient déjà une expérience professionnelle même minime dans le BTP, génie civil, métallurgie. Actuellement, c'est l'inverse qui est fait, on sélectionne d'abord des plongeurs que l'on va ensuite former aux travaux sous-marins pour en faire des scaphandriers.

Ces manques ont d'ores et déjà incité les entreprises à construire un parcours de professionnalisation post-CAH qui est en cours d'acceptation et qui comprendra 4 modules professionnalisant plus techniques, notamment sur le type de gestes et de travaux à réaliser au quotidien avec un financement possible du parcours par les entreprises. L'objectif serait à terme, d'ajouter un module fait par l'entreprise, mais il est difficile de dépêcher des personnes disponibles dans ces structures (Titre professionnel de scaphandrier des Travaux publics validé par la délégation générale à l'emploi et à la formation professionnelle en janvier 2014 et publié par arrêté Ministériel).

Jusqu'à présent, le CAH était valable 10 ans au bout desquels un renouvellement administratif était fait par l'INPP sur la base de l'historique de plongée du scaphandrier. Avec la nouvelle réglementation, le CAH ne sera plus valable que 5 années et sera renouvelé sous couvert d'une cession de « remise à niveau des connaissances » dispensée au scaphandrier et dont le contenu devrait être adapté suivant l'historique de plongée et notamment la régularité des plongées.

Organisation du travail sur le chantier

Le cumul des fonctions par les travailleurs sur un chantier pose des problèmes organisationnels et crée la confusion pour le travailleur sur les rôles qu'il doit assumer suivant chaque fonction qu'il est amené à exercer. Il serait judicieux d'intégrer ces notions de « glissements » de fonctions au cours de la formation des personnels.

Dans la formation de base CAH, les plongeurs vont être formés à toutes les fonctions qu'ils pourront occuper sur un chantier, y compris le COH. En revanche, c'est l'entreprise qui désigne le COH. Théoriquement, un plongeur sortant de la formation ne devrait pas être désigné COH car il n'a pas encore l'expérience requise.

Gaz respiratoires

❖ ***Trimix***

Compte tenu des tables de décompression disponibles en France, l'intérêt de l'emploi du Trimix commence à 50 mètres mais il pourrait être intéressant de démarrer son usage dès 40 à 42 mètres considérant son intérêt par rapport à l'air.

Méthodes d'intervention

❖ ***Recycleur***

Le recycleur pourrait être utile dans le domaine des travaux sous-marins pour les plongées dites « sous plafond » (galeries, sous glace), dans le cadre de la réalisation de relevés topographiques ou pour la réalisation de mesures en amont de la mise en œuvre d'un chantier (investigation, contrôles, repérages, mesures diverses, …).

La formation des plongeurs de la mention A, classe III telle qu'elle est dispensée à l'INPP n'est pas appropriée pour ce type d'activités. Il est nécessaire de mettre en place des formations plus spécifiques, pour l'utilisation des matériels différents dans des conditions particulières. Une compétence spécifique a notamment été mise en place pour la plongée sous plafond pour les pompiers de Paris.

L'usage de cette méthode d'intervention fournirait un avantage en termes de sécurité pour les plongeurs de la mention A car elle présente des avantages physiologiques importants au prix d'une complexité technique matérielle solvable et bien connue.

Cette méthode d'intervention permet notamment une durée de survie plus longue en cas d'incident et offre ainsi la possibilité de gérer cet incident, même lorsqu'il s'agit de travaux à grande profondeur (elle permet par exemple au scaphandrier de regagner la tourelle ou la bulle de plongée pour être remonté).

L'usage du recycleur permet d'augmenter l'autonomie sous l'eau et ainsi le temps de survie en cas de problème. Cette technique offre également l'avantage de respirer le gaz ou mélange respiratoire le mieux adapté suivant la profondeur à laquelle on se trouve. Elle permet de respirer une quantité adaptée et optimisée d'oxygène qui agit positivement en diminuant la sensation de froid, la fatigue et surtout le risque d'accidents de décompression.

Organisation de la prévention

❖ ***Contrôle des EPI***

Le Ministère du travail a borné pour les scaphandriers la prévention aux équipements de protection individuelle. Pour les travaux immergés, il s'agit donc du casque et du détendeur, de l'alimentation de secours, de la communication, de la tenue pour protéger le plongeur du froid et du chaud. Il existe des réglementations qui encadrent les opérations de maintenance en surface, les opérations de maintenance sur les EPI du plongeur assurant sa sécurité en plongée, mais rien n'est défini entre les 2. Par exemple, il n'existe pas de préconisations d'entretien ni aucune procédure concernant la maintenance du tuyau du narguilé. L'idéal serait de mettre en place une prévention autour du système respiratoire, depuis la source de gaz jusqu'au plongeur.

❖ ***Matériels utilisés sur le chantier***

Sur certains chantiers, les travailleurs viennent avec leur propre matériel, notamment les intérimaires. La multiplicité des matériels de plongée sur un même chantier est source d'accidents. Par ailleurs, certains plongeurs réalisent eux-mêmes des ajustements techniques sur leur matériel et ce type de pratiques est dangereux. Dans le cadre d'une utilisation professionnelle, il n'est pas possible d'autoriser les travailleurs à plonger avec du matériel modifié.

Un autre problème à souligner concerne la capacité d'auto-certification CE de certains matériels, introduite par la directive « Machines » (directive 2006/42/CE). Certains matériels vendus en Europe peuvent ainsi être auto-certifiés CE. Si les personnes ne sont pas expertes, il est possible d'acheter du matériel faussement certifié CE (par exemple des postes à souder il y a quelques années, produits dans le Sud de l'Europe et porteurs d'auto-certifications frauduleuses).

Traçabilité des parcours

Depuis les lois sur la pénibilité, l'employeur est tenu de conserver une liste et un enregistrement sous format papier de toutes les feuilles de plongée (cela représenterait *a priori* 60 000 feuilles par an). Un jeu devrait être communiqué à la Médecine du Travail mais dans la pratique ce n'est pas systématiquement le cas puisque, suivant les entreprises, le médecin du travail ne dispose pas toujours de la logistique nécessaire pour gérer un tonnage de papier de cette envergure. Pour garantir une traçabilité optimale des expositions des travailleurs concernés, la profession est en attente d'un accord écrit sur la possibilité de conserver ces documents sous format électronique.

2.6.2 Mention B

2.6.2.1 Activités physiques ou sportives

Caractérisation de la population professionnelle

❖ ***Métiers représentés et répartition des effectifs***

Les travailleurs relevant de la mention B, catégorie « activités physiques ou sportives » sont les encadrants (ou moniteurs) professionnels de « plongée sportive ». Ils sont habilités à dispenser des formations de plongée à l'air et aux mélanges (Nitrox et Trimix) avec emploi de scaphandre autonome et recycleurs. Une activité de formation apnée est également enseignée.

On dénombre environ 2000 encadrants professionnels saisonniers qui travaillent majoritairement l'été. En effet, la plupart des centres de plongée loisir situés en métropole emploient principalement des encadrants professionnels en contrat à durée déterminée (CDD) pendant les 2 mois d'été, voire 7 à 8 mois suivant la localisation des clubs (D'après les enquêtes FFESSM, SMPS-CGT et UCPA, 2013).

Ces encadrants professionnels sont considérés dans le décret du 11 janvier 2011 comme des travailleurs hyperbares. Néanmoins, l'article 8 du décret précise que des *« Dispositions spécifiques aux établissements d'activités physiques ou sportives qui organisent la pratique ou dispensent l'enseignement de la plongée subaquatique »* sont intégrées dans le code des sports. Il en résulte que les conditions d'exercice de ces travailleurs ne dépendent pas directement du Ministère du Travail (D'après enquête SMPS-CGT, 2013).

Par ailleurs, certains encadrants exercent des fonctions de moniteur à titre bénévole et leurs activités dépendent directement du Ministère des sports. En effet, sous réserve que l'activité de plongée (en scaphandre autonome, en apnée…) soit mise en œuvre par une association affiliée à la fédération française d'études et de sports sous-marins (FFESSM) ou à la fédération sportive et gymnique du travail (FSGT), il est possible pour un bénévole membre de cette association et possédant les qualifications requises (brevets de moniteur fédéral) d'encadrer (Arrêté du 25 avril 2012 portant application de l'article R. 227-13 du code de l'action sociale et des familles).

❖ ***Age des travailleurs***

Les encadrants professionnels ont en moyenne entre 25 et 35 ans (D'après les enquêtes FFESSM, SMPS-CGT et UCPA, 2013).

❖ ***Description de l'activité (type d'activité, fréquence d'intervention…)***

Les encadrants professionnels de plongée ont pour activités principales l'enseignement de la plongée à des plongeurs débutants ou qualifiés ainsi que l'encadrement des plongeurs lors d'explorations en milieu naturel. Ils doivent assurer la sécurité des participants en vérifiant notamment la disponibilité et l'entretien du matériel. Suivant leur niveau de qualification, les moniteurs peuvent également être habilités à monter leur propre structure de plongée ou devenir directeur d'un centre de plongée.

En accompagnement ou en encadrement, les moniteurs (professionnels et bénévoles) évoluent majoritairement à l'air. Dans le code des sports, il est prévu qu'ils puissent encadrer jusqu'à une profondeur de 60 mètres alors que le code du travail n'autorise qu'une profondeur maximale de 50 mètres.

Outre l'encadrement de plongeurs lors de plongées à l'air en scaphandre autonome, les encadrants professionnels de plongée peuvent maîtriser d'autres spécialités comme la plongée technique (plongée aux mélanges et plongée aux recycleurs) ou l'apnée, sous réserve de l'obtention des certificats ou brevets complémentaires adaptés. L'enseignement de la plongée

subaquatique autonome au mélange Trimix ou Héliox est limité à 80 mètres. Un dépassement accidentel de cette profondeur est toléré dans la limite de 5 mètres.

Dans la pratique, les encadrants professionnels seraient amenés à multiplier les immersions et à faire des plongées ludions (« yoyo »), notamment en haute saison, où ils feraient parfois jusqu'à 4 plongées par jour (1 plongée profonde le matin et 3 plongées à 20 mètres l'après-midi).

La majorité des employés travaillent entre fin juin et septembre, une autre partie minoritaire travaille entre avril et octobre. Théoriquement, les encadrants professionnels doivent disposer d'une journée de repos par semaine, mais il est possible que de nombreux encadrants en profitent pour faire des plongées à titre personnel pour leurs loisirs. Par ailleurs, il n'existe pas de progressivité imposée de reprise après arrêt prolongé d'activité, les saisonniers reprennent d'emblée à temps plein et avec un rythme soutenu. Ces travailleurs restent entre 3 et 5 ans dans la profession (D'après les enquêtes FFESSM, SMPS-CGT et UCPA, 2013).

❖ ***Formation du personnel***

Pour être encadrant professionnel de plongée, il faut être titulaire d'un diplôme, d'un titre à finalité professionnelle ou d'un certificat de qualification ouvrant droit à l'enseignement, à l'animation, à l'encadrement ou à l'entrainement des activités de plongée sportive contre rémunération.

Le secteur de la plongée subaquatique de loisir a conduit ces dernières années une réforme globale de sa filière professionnelle. Trois diplômes ont ainsi été créés permettant chacun l'exercice d'une fonction spécifique :

- le Brevet Professionnel de la Jeunesse, de l'Education Populaire et du sport (BP JEPS) spécialité "plongée subaquatique" permet d'exercer les fonctions de guide de palanquée, d'assistant de surface, d'entretien et de maintenance du matériel... ;
- le Diplôme d'Etat de la Jeunesse, de l'Education Populaire et du sport (DE JEPS) spécialité "perfectionnement sportif", mention "plongée subaquatique" permet d'exercer les fonctions de directeur technique, de directeur de plongée, de gestionnaire de structure, d'enseignant pour les plongeurs, d'entraîneur pour les activités compétitives et d'apnée … ;
- le Diplôme d'Etat de la Jeunesse, de l'Education Populaire et du sport (DE JEPS) spécialité "performance sportive", mention "plongée subaquatique" permet d'exercer les fonctions d'expertise technique en plongée, de direction des activités subaquatiques à l'échelle d'une structure de grande taille nécessitant la gestion d'une équipe, et d'ingénierie de formation de cadres, dans les domaines de la plongée en scaphandre et/ou des pratiques en apnée....

Il existe trois niveaux de formation des moniteurs bénévoles de l'encadrement de la plongée :

- Le premier niveau de qualification professionnelle pour l'encadrement bénévole de la plongée est le brevet « Initiateur » (E1 – initiateur club ou E2 – Initiateur/Guide de palanquée)
- Le deuxième niveau de qualification professionnelle pour l'encadrement bénévole de la plongée est le niveau « Moniteur Fédéral 1er degré» (MF1, E3 ou encadrant de niveau 3)
- Le troisième niveau de qualification professionnelle pour l'encadrement bénévole de la plongée est le niveau « Moniteur Fédéral 2nd degré» (MF2, E4 ou encadrant de niveau 4).

Pour enseigner la plongée technique[2] ou l'apnée[3], il est nécessaire pour les encadrants de détenir des qualifications d'enseignement complémentaires. Pour chaque technique dispensée à la

[2] Plongée technique : Qualification plongée au Nitrox, qualification plongée au Trimix, qualifications plongée aux recycleurs, qualifications plongée aux recycleurs à circuit fermé.

FFESSM ou à la FSGT, il existe un niveau Moniteur/encadrant permettant l'enseignement de la discipline.

Modalités de remise à niveau des personnels sur l'utilisation des matériels

Les moniteurs ont la possibilité de faire un stage de 2 jours chez les fabricants de matériels. A l'issue de ce stage, ils obtiennent une qualification valable 2 ans, leur permettant d'entretenir eux-mêmes le matériel des centres de plongée dans lesquels ils travaillent. Au sein de chaque centre, la liste des personnes habilitées à faire cet entretien est tenue à jour annuellement.

Intervention et exécution de travaux en milieu hyperbare (D'après les enquêtes FFESSM, SMPS-CGT et UCPA, 2013)

❖ ***Nature des gaz utilisés***

➢ **Air comprimé**

L'air est utilisé par l'ensemble des encadrants salariés.

➢ **Nitrox**

Les mélanges Nitrox sont utilisés ponctuellement, en mélange fond ou en décompression, sous réserve que le professionnel soit détenteur de la qualification « moniteur Nitrox ».

➢ **Oxygène**

L'oxygène pur est utilisé en décompression.

➢ **Trimix, Héliox**

L'utilisation des ces mélanges est exceptionnelle.

Avantages de l'utilisation des mélanges respiratoires par rapport à l'air pour les travailleurs de la mention B

L'utilisation des mélanges Nitrox permet d'optimiser la décompression des encadrants professionnels et de diminuer la fatigue en fin de saison.

Le bénéfice apporté par l'utilisation des mélanges Nitrox au lieu de l'air est conditionné par le nombre de plongées par jour.

Lorsque les encadrants sont amenés à faire 2 plongées par jour ou plus, le Nitrox est plus sécuritaire.

Limites de l'utilisation des mélanges respiratoires par rapport à l'air pour les travailleurs de la mention B

La plongée au Nitrox nécessite des moyens matériels (compresseur à membrane, équipements spécifiques…) et humains (qualification moniteur Nitrox) dont la majorité des centres de plongée ne peuvent disposer.

[3] Niveaux et brevets d'apnée : chapitres du Manuel de Formation en Apnée de la FFESSM et FSGT.

Type de tables de décompression/ Ordinateurs utilisés

Les encadrants utilisent les tables MN 90 modifiées 96 ou des logiciels de décompression pour les plongées à l'air ou aux mélanges.

Le nouveau décret autorise l'employeur, sous couvert d'une justification et d'une garantie en termes de procédures de sécurité à utiliser d'autres tables de décompression ou ordinateurs de plongées que ceux validés par le Ministère du travail. La décompression d'une plongée aux mélanges peut donc être conduite soit à l'aide de tables spécifiques, soit à l'aide d'un ordinateur conçu pour la plongée aux mélanges.

Au sein d'une palanquée, en cas de différence entre les gaz de plongée utilisés, c'est la table de décompression la plus contraignante qui s'applique.

Mode de fabrication et modalités d'analyse des gaz :

L'air comprimé est fabriqué par un compresseur d'air avec bouteilles tampon de stockage.

La qualité de l'air en sortie du compresseur est analysée 1 fois par an, avec affichage des résultats. La prise d'air pour la fabrication d'air comprimé ne doit pas être dans une zone polluée, mais le contrôle réglementaire sur ce point mérite d'être approfondi.

Concernant l'analyse du Nitrox, une fois la bouteille sortie du compresseur, l'utilisateur prend la bouteille et doit obligatoirement contrôler le taux d'oxygène. Ce contrôle permet de calculer la profondeur maximale qui peut être atteinte sans risque d'hyperoxie.

❖ ***Méthodes d'intervention***

➢ **Scaphandre autonome (SCUBA)**

L'ensemble des encadrants utilisent le SCUBA alimenté en air comprimé. Une population plus restreinte de moniteurs plonge au Nitrox, notamment pour la plongée successive, afin de limiter la fatigue.

➢ **Recycleur**

Dans le cadre de la pratique ou de l'enseignement de la plongée subaquatique aux mélanges respiratoires, les moniteurs sont amenés à utiliser des recycleurs alimentés en Nitrox, oxygène pur et Trimix.

➢ **Apnée**

L'apnée est enseignée par des encadrants de plongée sous-marine qui sont par ailleurs habilités à enseigner toutes les activités sous-marines.

Les conditions d'exercice de l'apnée dans le cadre des activités sportives sont déterminées par le Code du Sport. Dans le cadre de la plongée loisir, cette pratique n'est pas considérée comme un moyen de pénétration du milieu sous-marin avec des objectifs liés à un métier, mais est considérée comme ayant un but sportif (se préparer ou entrainer ses élèves) avec le plus souvent des visées compétitives. C'est pour cette raison que les profondeurs ne sont pas précisées, ni limitées dans le texte.

❖ ***Procédures d'intervention et procédures de secours***

L'équipe minimale requise pour encadrer les activités de loisir est constituée d'une sécurité en surface et d'un encadrant au fond avec son ou ses élève(s). Un encadrant peut être responsable au maximum de 1 élève lors d'un baptême et jusqu'à 4 plongeurs en palanquée.

- ***Maintenance et entretien du matériel***

Modalités de contrôle

Le matériel est individuel pour les licenciés ou appartient aux structures commerciales dans certains cas.

Les détendeurs sont révisés annuellement pour les structures ; pour les licenciés cette révision est préconisée.

Le suivi des blocs bouteilles est assuré par des techniciens TIV (techniciens d'inspection visuelle) avec un suivi des inspections visuelles annuelles et la requalification tous les 5 ans.

La Fédération assure la formation de ses techniciens TIV.

Concernant les recycleurs, l'utilisateur se conforme à la notice d'utilisation du fabricant de chaque appareil.

EPI, casque, tenue, communication

La révision des détendeurs et des éléments de robinetteries est faite par les responsables désignés ayant participé au stage prévu par l'équipementier.

L'inspection visuelle et la requalification des blocs de plongée sont réalisées par un professionnel. Une inspection TIV est faite par un technicien d'inspection visuelle tous les ans. Une requalification des blocs a lieu tous les 5 ans.

Prophylaxie

Concernant la désinfection des détendeurs et combinaisons, elle est faite par trempage dans des bacs dans certains clubs.

Traçabilité des contrôles

Un registre d'entretien du matériel trace les opérations de maintenance et les vérifications opérées sur l'ensemble du matériel de plongée.

A chaque bloc de plongée est associé un registre de suivi et d'entretien qui trace les différents contrôles effectués.

- ***Remarques de la profession***

Réglementation

Les profondeurs d'intervention à l'air des encadrants salariés sont définies par le Ministère des Sports dans le Code du Sport, (12, 20, 40 et 60 mètres) et ne correspondent pas à celles du décret n°2011-45 du 11 janvier 2011 (12, 30 et 50 mètres) pour les classes 0, I et II. Les moniteurs brevetés du Ministère des Sports sont donc titulaires d'un CAH, mais ils ne sont pas classés au sens du Ministère du Travail puisque les profondeurs d'intervention sont différentes de celles du décret. Il est nécessaire d'harmoniser le code des sports avec le code du Travail pour lever ces ambiguïtés (D'après enquête SMPS-CGT, 2013).

Gaz respiratoires

Les professionnels de l'encadrement de la plongée sont en attente de l'arrêté d'application les concernant. Si l'arrêté autorise plus de 2 plongées d'encadrement par jour, l'utilisation de mélanges respiratoires Nitrox est plus sécuritaire car elle les préserve mieux de l'ADD et des effets de la fatigue notamment.

En revanche, si le nombre de plongées est limité à 2 par jour, l'utilisation de l'air reste admissible même en étant moins sécuritaire.

Néanmoins, il ne faudrait pas utiliser le Nitrox et la baisse des effets secondaires qui l'accompagne au regard de la plongée à l'air, pour augmenter le quota journalier de plongées des encadrants. La confédération générale du travail (CGT) préconise 2 plongées maximum par jour, avec comme gaz respiratoire l'air pour des plongées jusqu'à 50 mètres et du Trimix normoxique dans la zone 50-60 mètres.

Méthodes d'intervention

Apnée

Selon le syndicat des professionnels de l'enseignement de la plongée interrogé (la CGT), l'apnée professionnelle ne devrait pas concerner la « plongée sportive ». Il est nécessaire de bien faire la distinction entre « travailleur hyperbare » et « compétiteur hyperbare ». A ce titre, il ne faudrait pas créer des moniteurs professionnels spécifiquement pour l'apnée. En revanche, un encadrant professionnel de plongée peut être amené à exercer sa profession préférentiellement en encadrement apnée. Ce mode d'exercice est alors défini dans le profil du poste par l'employeur. Il y a risque de dérive réglementaire sur cette notion de « moniteur professionnel apnée » qu'il n'est pas bon d'accepter et encore moins d'encourager selon le syndicat.

L'apnée peut être un moyen d'intervention envisageable pour certains professionnels, comme pour les scientifiques, dans des missions particulières où le transport de matériel de plongée est problématique. Néanmoins, intervenir sous l'eau sans disposer d'une source de gaz respiratoire constitue en soi un risque évident et la question est de savoir pour quel type d'interventions ce risque peut être considéré comme acceptable.

Organisation de la prévention

Matériels utilisés sur le chantier

Les moniteurs peuvent utiliser leur propre matériel ce qui peut présenter un problème en termes de sécurité. Cette situation est peu fréquente dans les grosses structures de plongée, mais peut concerner les petites structures. Par ailleurs, les encadrants professionnels préfèrent avoir leurs propres détendeurs et leurs propres gilets stabilisateurs. Il n'en demeure pas moins que la responsabilité incombe à l'employeur en cas de problème.

2.6.2.2 Archéologie sous-marine et subaquatique

Caractérisation de la population professionnelle

❖ ***Métiers représentés et répartition des effectifs***

Les travailleurs relevant de la mention B, catégorie « archéologie sous-marine et subaquatique » sont les plongeurs archéologues. L'archéologie subaquatique dépend des Ministères de la Culture et du Travail. La législation du Ministère du Travail est donc applicable aux fouilles archéologiques subaquatiques, et relève de la mention B et de la classe correspondant à la profondeur du chantier envisagé.

L'effectif actuel en France est d'environ 300 plongeurs archéologues classés. Les travailleurs de la classe II constituent la majorité des effectifs. Quelques plongeurs appartiennent à la classe I et certains à la classe III, souvent en lien avec une expérience professionnelle antérieure.

Dans les années 1980, l'effectif des plongeurs archéologues atteignait les 800. Cet écart est lié au fait qu'actuellement, beaucoup de plongeurs archéologues ne sont pas classés ; ils bénéficient des mesures dérogatoires (classement temporaire) mises en place entre 1990 et 1994 (D'après audition DRASSM, 2013).

En France, le département des recherches archéologiques subaquatiques et sous-marines (DRASSM) est en charge de la gestion du patrimoine immergé et des opérations de recherches associées. Le DRASSM assure également l'instruction des dossiers de dérogation au CAH pour les plongeurs bénévoles qui souhaitent obtenir une autorisation de participation à un chantier subaquatique. Cette dérogation est un classement temporaire qui permet à un plongeur loisir expérimenté d'intervenir sur un chantier donné.

❖ ***Age des travailleurs***

L'âge moyen des travailleurs est de 40-45 ans avec des extrêmes allant de 30 ans pour les plus jeunes jusqu'à 60 ans pour les plus âgés. Cette moyenne d'âge plutôt élevée s'explique par le fait qu'il est nécessaire d'avoir au moins 10 ans d'expérience pour être archéologue sous-marin (D'après audition DRASSM, 2013).

❖ ***Description de l'activité (type d'activité, fréquence d'intervention…)***

Les plongeurs archéologues participent aux chantiers immergés d'archéologie sur des sites pouvant être maritimes (épaves, ports…) ou dans les eaux intérieures (ponts, structures immergées…). Les opérations vont de la prospection (exploration et expertise d'une zone donnée) à la fouille (étude approfondie d'un site), généralement précédée par un sondage dont l'objectif est notamment d'évaluer l'envergure d'un site et son intérêt scientifique.

Les problématiques liées à l'organisation d'un chantier de fouilles archéologiques sous-marines sont très spécifiques. Il s'agit d'abord de réunir une équipe pluridisciplinaire qui va intervenir simultanément sur le fond. Cette équipe peut-être constituée de 12 à 30 plongeurs (dans le cas d'un chantier à 50 mètres de profondeur par exemple) dont les niveaux techniques sont différents. Plus le site est profond, plus il est nécessaire que les plongeurs soient nombreux car le temps effectif au fond par personne diminue et il faut donc plus de main d'œuvre pour couvrir la même surface (D'après audition DRASSM, 2013).

La plupart du temps, les profils de plongées sont des plongées « carrées » et au sein de l'équipe, mis à part les vidéastes et les photographes, tous les plongeurs sur le chantier sont tenus de se conformer aux exigences définies dans le manuel des opérations hyperbares (D'après audition DRASSM, 2013).

L'expertise du DRASSM est internationalement reconnue dans l'évaluation et l'étude d'épaves de navire, d'habitats lacustres préhistoriques ou encore de grottes sous-marines. Le DRASSM n'envisage pas de mettre en œuvre des chantiers archéologiques sous-marins au-delà de 50 mètres de profondeur car les plongeurs ont besoin de temps pour travailler. A 50 mètres, le temps au fond est déjà très compté et les plongées suffisamment répétitives. Au-delà de cette profondeur, il n'est plus possible d'envoyer une équipe pluridisciplinaire, le temps est trop limité pour travailler. Pour donner un ordre d'idée, l'exploration d'une épave nécessite 5000 à 6000 heures de travail.

Une vingtaine d'archéologues sous-marins travaillent au DRASSM et réalisent 10 à 50 interventions par an. Cette fréquence est nettement inférieure au rythme tenu à la fin des années 1970, où les archéologues faisaient 200 plongées par an. Les plongeurs n'ont pas un nombre de plongées minimum imposé par an.

La durée d'une carrière est de 30 ans maximum en fonction de l'avis du médecin (perte des compétences de plongée, problèmes d'oreilles…) ce qui équivaut à plus de 10000 heures dans l'eau (D'après audition DRASSM, 2013).

❖ ***Formation du personnel***

Les plongeurs archéologues ont suivi un cursus classique en archéologie avec une spécialisation en archéologie navale ou nautique.

Ils sont formés dans un second temps à la plongée professionnelle. En effet, depuis le début des années 1990, les plongeurs archéologues sont soumis à l'obligation de posséder un CAH mention B, classe I pour intervenir jusqu'à 30 mètres de profondeur, classe II jusqu'à 50 mètres, et classe III au-delà de cette profondeur. Ce certificat peut être obtenu à l'issue d'une formation professionnelle suivie dans un centre agréé.

Le CAH peut être délivré sans passage d'examen, à titre temporaire, à tout plongeur archéologue bénévole qui en aura fait la demande pour un chantier déterminé situé à moins de 40 mètres de profondeur.

Intervention et exécution de travaux en milieu hyperbare (D'après audition DRASSM, 2013)

❖ ***Nature des gaz utilisés***

➢ **Air comprimé**

L'air comprimé est utilisé par l'ensemble des plongeurs archéologues.

➢ **Nitrox**

Les mélanges Nitrox sont utilisés en tant que mélange fond depuis peu. Pour le moment, il s'agit de mélange Nitrox contenant 35% d'oxygène, permettant de correspondre aux tables de décompression autorisées par le ministère du travail.

➢ **Oxygène**

L'oxygène pur aux paliers était utilisé systématiquement en décompression dans les années 80, mais actuellement, son utilisation dépend des plongées.

Avantages de l'utilisation des mélanges respiratoires par rapport à l'air pour les travailleurs de la mention B

L'utilisation du Nitrox débute au sein de la profession et permet aux archéologues d'effectuer un travail de plus longue durée sous l'eau avec une économie de fatigue. C'est un facteur de sécurité et le DRASSM est actuellement en réflexion sur une généralisation de cette technique.

Type de tables de décompression/ Ordinateurs utilisés

Les tables de décompression utilisées sont celles publiées par le Ministère du travail (profondeur et durée de travail).

Mode de fabrication et modalités d'analyse des gaz :

L'air comprimé est fabriqué sur place à l'aide d'un compresseur et les gaz et mélanges respiratoires sont achetés prêts à l'emploi auprès des fournisseurs.

Concernant les mélanges Nitrox utilisés, une analyse pré-immersion de leur composition est réalisée (contrôle du taux d'oxygène).

❖ ***Méthodes d'intervention***

➢ **Narguilé**

Cette méthode était utilisée auparavant pour des chantiers sur des petits fonds (années 1970-1980), mais il s'est avéré qu'en termes de mode opératoire, il peut être difficile de gérer le narguilé. C'est une technique utilisable pour des interventions d'opportunité.

- **Scaphandre autonome (SCUBA)**

Le SCUBA est la méthode d'intervention de référence utilisée par les plongeurs archéologues. Le gaz respiratoire privilégié étant l'air comprimé.

- **Recycleur**

Actuellement, les plongeurs archéologues n'utilisent pas de recycleurs pour leurs interventions subaquatiques.

- **Caisson de décompression**

Le DRASSM ne dispose pas de caisson propre. Il privilégie quand cela est possible, la mise en œuvre d'une chaîne de secours avec transfert et recompression en milieu hospitalier. Le cas échéant, la location extemporanée d'un caisson permet d'avoir un caisson en bon état de fonctionnement le moment venu.

- **Apnée**

Cette méthode d'intervention n'est pas mise en œuvre pour les activités des plongeurs archéologues.

❖ ***Procédures d'intervention et procédures de secours***

Sur chaque chantier, le COH assure la sécurité des plongées avec le chef de chantier.

Une spécificité de l'archéologie sous-marine concerne la fonction de contrôleurs d'opérations hyperbares du DRASSM. Définis par zone géographique, ils peuvent intervenir n'importe quand pour contrôler les chantiers (connaissance des procédures de sécurité, aptitude des plongeurs…). La consigne pour ces contrôleurs est d'apporter des conseils de bonnes pratiques et de sécurité. Suivant le niveau de gravité des dysfonctionnements relevés sur le chantier, le contrôleur en informe le DRASSM. Les problèmes fréquemment relevés concernent la qualification (les plongeurs sur le chantier n'ont pas le niveau requis) et l'aptitude (faux certificats médicaux) des plongeurs. Par ailleurs, sur certains chantiers disposant de peu de moyens, il peut arriver que chacun apporte son matériel pour travailler, ce qui pose des problèmes de sécurité (d'après audition DRASSM, 2013).

❖ ***Maintenance et entretien du matériel***

Modalités de contrôle

Le matériel utilisé par les plongeurs est individuel.

Le matériel est retourné directement chez le fabricant qui réalise les opérations de maintenance.

Prophylaxie

Concernant la désinfection des détendeurs et combinaisons, elle est faite par trempage dans des bacs de Septivon®, mais il n'existe aucune procédure codifiée.

❖ ***Remarques de la profession***

Gaz respiratoires

Nitrox

Il n'existe pas de formation spécifique pour les professionnels archéologues permettant l'utilisation du Nitrox et de l'oxygène en décompression. En effet, pour cause de vide juridique, il est recommandé que ces professionnels suivent la formation de qualification Nitrox proposée par les fédérations sportives. Mais pour le moment, l'utilisation du Nitrox n'est pas encore très développée au sein du DRASSM et dans l'éventualité de sa généralisation, une procédure de formation des plongeurs est en réflexion.

Méthodes d'intervention

Recycleur

Dans le contexte actuel, ce n'est pas forcément le matériel dont les archéologues souhaitent développer l'utilisation. Il s'agit d'un matériel complexe d'utilisation mais également complexe en termes de formation, sécurité et entretien.

Il serait envisageable de l'utiliser à petite échelle, sur un effectif limité de plongeurs, pour réaliser une expertise photographique et archéologique avant le démarrage d'un chantier de fouilles par exemple. Cela devient plus complexe si l'on souhaite faire plonger au recycleur une équipe de 30 personnes.

A la connaissance du DRASSM, au niveau international, il n'y a aucun pays qui plonge aux recycleurs dans le cadre de fouilles archéologiques. Cette technique d'intervention est peut-être mise en œuvre ponctuellement pour descendre sur des épaves, mais pas pour réaliser un chantier de fouilles pluridisciplinaires.

Apnée

Cette pratique pourrait être intéressante pour des interventions ponctuelles de type récupération de matériel ou incursion d'opportunité, pour des interventions de bord de plage, mais ne pourrait pas être développée comme méthode de travail dans le cadre d'un chantier de fouilles archéologiques.

Robots ou véhicules sous-marins télé-opérés (ROVs pour « remotely operated vehicle »)

Très utile aux plongeurs militaires, le ROV, contrôlé à distance par un opérateur est encore trop rustre pour les sciences et l'archéologie.

La solution réside dans le développement de robots perfectionnés, capables de réaliser des opérations fines sous l'eau avec un ressenti de l'opérateur en surface et qui pourraient atteindre les grandes profondeurs (2000 à 2500 mètres). L'avenir réside dans le développement de ces appareils permettant de sonder les grands fonds.

2.6.2.3 Défense

Définition de la population professionnelle

❖ ***Métiers représentés et répartition des effectifs***

Les travailleurs relevant de la mention B, catégorie « défense » sont les plongeurs militaires. Tous métiers confondus, le nombre de travailleurs hyperbares répartis entre les 3 armées (terre, air et marine) et la gendarmerie représente environ 2 000 plongeurs (D'après audition Cephismer, 2013).

Les effectifs des différents « métiers » de la défense représentés au sein de la mention B sont répartis de la manière suivante :

- classe I : 1400 plongeurs de bord (PLB) au sein de l'une des 3 armées ou de la gendarmerie ;
- classe II : 100 nageurs de combat (NC), auxquels viennent s'ajouter 200 plongeurs de combat du génie (PCG) ;
- classe III : 300 plongeurs démineurs (PLD).

La Cephismer de la force d'action navale est responsable de l'expertise dans le domaine de la plongée humaine et de l'intervention sous la mer. Elle est en charge de l'élaboration de la réglementation de la plongée dans la marine et de l'expérimentation des nouveaux appareils ou procédures de plongée. La cellule assure également l'entretien des qualifications des plongeurs de la marine, l'organisation et le contrôle des unités dans le domaine de la plongée humaine. Elle peut également être amenée à mettre en œuvre des moyens humains et matériels lors d'opérations d'intervention sous la mer (système permettant la ventilation de sous-marins en détresse, expertise/récupération d'épaves,…). Elle dispose d'un centre hyperbare situé dans l'arsenal militaire de Toulon.

❖ ***Age des travailleurs***

L'âge moyen des travailleurs hyperbares de cette population est très jeune avec une moyenne qui se situe entre 30 et 35 ans et des extrêmes allant de 18 à 55 ans (D'après audition Cephismer, 2013).

❖ ***Description de l'activité (type d'activité, fréquence d'intervention…)***

La qualification de « plongeur de bord » (Marine) ou de plongeur de niveau 1 militaire n'est pas un métier propre, il s'agit d'une compétence plongée de base, acquise *via* une formation, en complément d'une autre fonction (type mécanicien par exemple). Dans la Marine par exemple, les PLB peuvent être des personnels embarqués qui exercent, par ailleurs, un autre emploi principal à bord. C'est un 1er niveau de qualification avant de passer sur postes plus spécialisés (NC-PCG-PLD). Ces militaires sont habilités à plonger à l'air jusqu'à 40 mètres. Il s'agit d'une population qui va plonger en moyenne une dizaine d'années avant de se diriger vers d'autres fonctions, cette population reste donc très jeune (pas plus de 40 ans) (D'après audition Cephismer, 2013).

Les nageurs de combat sont des militaires des forces spéciales formées pour des missions à caractère offensif et opérant principalement en milieu aquatique. Ils constituent une population militaire dont la plongée est le cœur de métier, toute l'année et toute leur carrière. Les NC plongent principalement à l'oxygène pur au recycleur en circuit fermé (D'après audition Cephismer, 2013).

Les plongeurs de combat du génie sont les plongeurs de l'Armée de terre. La plongée est leur cœur de métier toute l'année, toute leur carrière. A la différence des nageurs de combat, les PCG évoluent presque uniquement dans les milieux d'eaux douces : lacs, fleuves et rivières, étangs, réseaux souterrains inondés… Les PCG plongent également à l'oxygène pur au recycleur en circuit fermé (D'après audition Cephismer, 2013).

Les plongeurs démineurs sont des militaires de la Marine nationale dont la plongée est le cœur de métier toute l'année, toute leur carrière. Ils sont amenés à participer à des opérations de déminage (recherche, identification et neutralisation d'engins explosifs détectés en mer et dans les ports). Spécialistes de la plongée, ils interviennent notamment au recycleur semi-fermé, jusqu'à des profondeurs de 80 mètres, en utilisant différents mélanges dont les 2 principaux sont le Nitrox ou le Trimix (D'après audition Cephismer, 2013).

Pour ces différentes catégories de plongeurs militaires, les plongées types sont des plongées d'incursion de courte durée (maximum de 20 minutes) et géolocalisées. Ce sont des plongées qualifiées de « carrées », les plongeurs descendent pour une profondeur et une durée données.

Une fois sur le fond ils modifient très peu la profondeur. En amont, la préparation de la plongée est très précise, le périmètre est bien délimité et les manquements à la procédure sont facilement et rapidement identifiés comme sortant du cadre défini. D'autres types de plongées spécifiques plus longues existent pour les NC ou PLD qui peuvent être amenés à intervenir 2 ou 3 heures à 20 mètres par exemple.

La fréquence moyenne des interventions annuelles en conditions hyperbares représente environ 80 plongées par plongeur par an (plutôt 100 pour les PLD). En moyenne, un PLB va plonger entre 8 et 10 ans et un PLD ou un NC pendant environ 20 ans (extrême à 35 ans).

Le nombre moyen d'interventions totales sur l'ensemble d'une carrière représente donc environ 500 plongées pour les PLB (à raison de 80 plongées par an réparties sur 8 ans) et autour de 2000 plongées pour les PLD et NC (une centaine de plongées par an pendant environ 20 ans) (D'après audition Cephismer, 2013).

❖ ***Formation du personnel***

Tous les plongeurs de bord, plongeurs démineurs, nageurs de combat et plongeurs de l'armée de Terre sont formés à l'Ecole de plongée de la Marine située à Saint-Mandrier (dans le Var). La Gendarmerie forme actuellement ses plongeurs à l'école d'Antibes (CNING)

La formation de plongeur de bord dure 5 semaines. Elle forme les militaires à la plongée jusqu'à 40 mètres à l'air. L'accès à cette formation ne nécessite aucun pré-requis, une sélection des candidats se fait sur leur aquaticité (appréhension du milieu aquatique).

La formation de nageur de combat dure 7 mois et nécessite d'être qualifié PLB. Les élèves apprennent dans un premier temps à plonger avec le matériel, puis dans un second temps, à travailler sous l'eau avec le matériel. Les militaires acquièrent une maitrise non seulement de la méthode de plongée mais également du travail sous l'eau utilisant un recycleur en circuit fermé alimenté en oxygène pur.

La formation de plongeur démineur dure 10 mois et nécessite d'être qualifié PLB. Son objectif est d'apprendre aux élèves à plonger au recycleur semi-fermé en utilisant des mélanges Nitrox et Trimix jusqu'à 80 mètres et à maitriser sous l'eau les techniques de déminage.

Les plongeurs de combat du génie reçoivent leur formation initiale à Saint-Mandrier lors du stage de plongeur de bord puis sont formés aux techniques subaquatiques à l'Ecole supérieure et d'application du génie (ESAG) d'Angers. Ils apprennent notamment à maîtriser la technique de plongée à l'oxygène pur au recycleur en circuit fermé.

Modalités de remise à niveau des personnels sur l'utilisation des matériels et les procédures de plongée

Pour les PLB de la Marine dont ce n'est pas le métier de plonger, un rendez-vous annuel appelé JSP (journée sécurité plongée) permet de revoir la documentation, le matériel et de s'assurer que les notions sont bien intégrées. La Cephismer contrôle tous les 4 ans l'aptitude professionnelle de ces plongeurs lors du stage quadriennal de contrôle professionnel des PLB. Au cours de ce stage, les plongeurs sont soumis à des tests théoriques (connaissances en réglementation, résolution de problèmes de plongée…) ainsi qu'à des tests pratiques en plongée afin de vérifier leur niveau technique dans le cadre de la réalisation d'un sauvetage. Par ailleurs, des audits de contrôle sont réalisés dans les unités de la Marine tous les deux à trois ans pour vérifier l'application des règlements, l'entretien du matériel et les capacités de l'unité à gérer un accident de plongée.

Les PLD et NC qui sont des professionnels de la plongée sont également soumis à la JSP annuelle. Ils sont par ailleurs tenus de réaliser l'entretien annuel de leur appareil (démontage, révision du manuel technique…). Des audits de contrôle sont conduits dans les unités tous les 2 ans par la Cephismer pour vérifier le matériel, la documentation, les entrainements, *etc.*

Pour les PLB, PLD et NC, la Marine impose des niveaux d'entrainements semestriels représentant entre 5 et 6 plongées imposées sur des exercices de sécurité (par tranche de 6 mois) dans le but de réviser les procédures de sécurité.

Concernant la fréquence de plongées par plongeur (PLB, NC et PLD), elle représente environ 50 plongées maximum par semestre. Dans la réglementation de la Marine, il est précisé que la régularité des plongées participe à la sécurité des plongeurs et ce maximum est donc un objectif à atteindre pour rester opérationnel (parfois même dépassé). La répartition des plongées sur le semestre doit se faire le plus régulièrement possible.

Si un plongeur n'a pas plongé depuis longtemps (retour de vacances, inaptitude, maladie…), l'armée impose une progressivité sur la reprise des plongées et l'atteinte des profondeurs maximum de travail (ne pas descendre à 80 mètres directement). Il s'agit d'une mesure assez récente (5-6 ans) et appliquée sans difficulté. Un tableau a ainsi été réalisé pour les PLB, NC et PLD de manière pragmatique en prenant en compte des tranches d'arrêt larges (ex : grosse coupure estivale, on repart de zéro en opposition avec une coupure de 15 jours où on repart du palier inférieur).

Traçabilité des parcours au sein de la Marine

La Cephismer centralise toutes les données des ressources humaines sur les plongeurs dans une base de données RH de la Marine qui recense par plongeur, entre autres les dates des contrôles quadriennaux et les aptitudes.

Une 2ème base de données concerne tout l'entrainement de la Marine et recense depuis 3 ans, toutes les plongées par plongeur (date de la plongée, mélange utilisé, profondeur…).

<u>Intervention et exécution de travaux en milieu hyperbare (D'après audition Cephismer, 2013)</u>

❖ ***Nature des gaz utilisés***

➢ **Air comprimé**

L'air est utilisé jusqu'à une profondeur de 50 mètres.

➢ **Nitrox**

Certaines catégories de plongeurs militaires utilisent des mélanges Nitrox à 60%, 50%, 40% ou 30% d'oxygène en circuit semi-fermé et des Nitrox contenant 40% d'oxygène en circuit ouvert.

Des mélanges contenant divers pourcentages en oxygène sont utilisés au centre hyperbare de la Cephismer.

➢ **Oxygène**

L'oxygène pur est utilisé en opération pour plonger jusqu'à 7 mètres, avec incursions de 3 minutes à 18 mètres (hors cadre du décret hyperbare) et aux paliers.

➢ **Trimix**

Des mélanges Trimix à 18% d'oxygène sont utilisés pour la plongée en circuit ouvert tandis que des mélanges contenant 23% d'oxygène sont utilisés avec un recycleur semi-fermé.

➢ **Héliox**

Les mélanges Héliox ne sont pas utilisés en unité opérationnelle, uniquement en centre hyperbare à 8 ou 10 % d'oxygène.

Avantages de l'utilisation des mélanges respiratoires par rapport à l'air pour les travailleurs de la mention B

L'utilisation des mélanges permet d'éviter les risques de narcose à l'azote et permet de diminuer la saturation des plongeurs.

Pour l'utilisation aux paliers, l'oxygène en mélange (80%) est mieux toléré par l'organisme que l'oxygène pur, il présente potentiellement un intérêt en terme de sécurité pour des populations professionnelles moins sélectionnées et donc plus sensibles, mais il n'est pas utilisé dans les armées, qui préfèrent l'oxygène pur.

Limites de l'utilisation des mélanges respiratoires par rapport à l'air pour les travailleurs de la mention B

L'utilisation des mélanges est complexe à mettre en œuvre (matériels et compétences spécifiques), plus onéreuse et expose les plongeurs aux risques d'accidents biochimiques.

Les mélanges binaires constitués d'hélium sont peu utilisés ou à des teneurs faibles en hélium parce qu'il s'agit d'un gaz qui entraine un important refroidissement et surtout qu'il est très cher.

Type de tables de décompression/ Ordinateurs utilisés

Ce sont les tables établies par la marine au centre hyperbare (les tables MN : Marine nationale).

Les ordinateurs de plongée ne sont pas utilisés par la marine à ce jour mais des systèmes apparentés sont en cours de développement. L'utilisation des ordinateurs pourraient être envisagée dans la population des NC et PLD, pas pour les PLB à priori.

Attention aux dérives d'utilisation des systèmes électroniques qui sont susceptibles de faire perdre tout sens critique aux plongeurs sur le contrôle de leur plongée.

Mode de fabrication et modalités d'analyse des gaz :

Les Armées ne fabriquent pas leurs gaz : elles se fournissent auprès d'un industriel qui garantit la conformité du gaz (processus qualité qui garantit que la bouteille fournie a été remplie avec le bon gaz). Les bouteilles de gaz remplies à partir des racks fournis par l'industriel sont identifiées par des bagues de couleurs qui correspondent au gaz et à son pourcentage.

Il n'y a pas de contrôle des gaz pré-immersion, mais avant le gonflage des bouteilles de plongée, des analyses de gaz des racks sont réalisées par le laboratoire d'analyses, de surveillance et d'expertise de la Marine (LASEM).

Avant la plongée, il n'est pas possible de réaliser des analyses de gaz fiables, des analyseurs de gaz portatifs sont mis à disposition des plongeurs et permettent de faire une levée de doutes, mais la vérification n'est pas imposée (en pratique peu le font).

Pendant l'exposition, il n'y a pas de contrôle. Un boitier électronique (sorte de boîte noire) peut donner des informations sur le gaz respiré en temps réel ou être exploité après la plongée. Ces mesures ne sont pas systématiques d'autant que ce n'est pas très opérationnel car difficile à calibrer et d'une fiabilité perfectible. L'utilisation de ce système reste néanmoins intéressante pour l'établissement de procédures par la CEPHISMER et pendant l'entraînement.

Après l'exposition, le LASEM peut faire des analyses des gaz et de la chaux sodée.

❖ ***Méthodes d'intervention***

➢ **Narguilé**

Les PLD (300 plongeurs) l'utilisent dans le cadre de travaux sous-marins légers. Il s'agit d'une activité spécifique. Tous les PLD sont formés à son utilisation, mais tous ne la pratiquent pas au quotidien. C'est une méthode de génie de combat rapide.

- **Scaphandre autonome (SCUBA)**

L'ensemble des plongeurs (2000 personnes) sont concernés par l'utilisation de cette technique avec respiration d'air ou de mélanges.

- **Recycleur**

Les plongeurs de la marine plongent aux recycleurs et aux mélanges depuis les années 50. Parmi les types d'appareils à recyclage de gaz utilisés, 3 sont à circuit fermé et 4 semi-fermé.

Sont concernés par cette technique les PCG, NC et PLD (environ 600 plongeurs). Cette pratique représente environ 60 000 plongées par an.

Ces appareils sont quotidiennement utilisés par les plongeurs de la Marine, pour des interventions dans des milieux de natures variées : mer (milieu salin), rarement des plongées en eau douce. L'armée de terre plonge avec en lacs et rivières. Quant à la gendarmerie, elle ne plonge qu'en circuit ouvert, excepté le GIGN dont les plongeurs peuvent utiliser des recycleurs à oxygène pur (FROGS)

Les profondeurs moyennes d'utilisation sont de 15 mètres en zone portuaire pour des profondeurs maximum d'utilisation de 35 mètres à l'air (PLB) et 80 mètres au Trimix (PLD). Les interventions durent en moyenne de 10 à 15 min.

Avantages de l'utilisation des recycleurs

Ces matériels offrent une autonomie importante en plongée. Ils sont également discret (pas d'émission de bulles) et amagnétiques.

D'un point de vue sanitaire, ils permettent de diminuer les risques de narcoses et d'accident de désaturation.

Inconvénients de l'utilisation des recycleurs

Ces appareils exposent les plongeurs à des risques d'accidents de type biochimique.

Par ailleurs la maitrise de cette technique de plongée nécessite un apprentissage long et plus complexe que pour les appareils à circuit ouvert.

Choix du type de recycleur (mécanique ou électronique)

Les plongeurs de la Marine utilisent des recycleurs mécaniques. En effet, les cellules oxygène qui entrent dans la composition des recycleurs électroniques ont une dérive dans le temps, elles vieillissent (on pense être à 100% d'oxygène alors qu'en fait on est à 90%). Ce critère de manque de fiabilité et de robustesse des cellules oxygène a été un des déterminants dans le choix de la marine française de fonctionner avec des recycleurs mécaniques et non électroniques. Certaines armées d'autres pays utilisent des recycleurs électroniques en interventions et connaissent des accidents (dont certains sont mortels).

Avantages de l'utilisation des recycleurs mécaniques par rapport aux recycleurs électroniques

L'avantage du recycleur mécanique est qu'il permet une fois sous l'eau de se concentrer uniquement sur le travail à réaliser et de ne pas avoir à contrôler sa PpO_2, *etc*. Le plongeur professionnel peut ainsi se détacher de la gestion des gaz et de l'appareil.

Le recycleur mécanique est moins onéreux que le recycleur électronique. En matière de coût d'achat et d'entretien, il y a un rapport de 1 à 3 entre du mécanique et de l'électronique. Un autre problème est qu'une plongée peut être arrêtée à cause d'une défaillance du système électronique (cellules oxygène notamment) alors que ce n'est pas le cas pour le recycleur mécanique.

Inconvénients de l'utilisation des recycleurs mécaniques par rapport aux recycleurs électroniques

Le recycleur mécanique restreint la réalisation du travail sous l'eau, en fonction du gaz choisi initialement, dans une fourchette de PpO_2, rendant compliqué l'établissement d'une table de plongée. Il est par ailleurs nécessaire d'avoir plusieurs mélanges fond si le travail se fait à des profondeurs différentes et donc un stock de bouteilles important en conséquence.

- **Caissons de recompression**

La marine dispose de 20-25 caissons de recompression de chantier dont l'utilisation concerne principalement les PLD. Environ 300 plongeurs sont ainsi capables de mettre en œuvre ce type de caissons sous la surveillance d'un médecin et/ou d'un infirmier. Ils fonctionnent à l'Air/oxygène ou aux mélanges.

Peu de caissons sont disponibles dans les autres armées. Le marin, de par son activité est amené à partir loin, en zones isolées il est donc nécessaire de disposer de caissons sur site (en comparaison avec les autres armées).

Avantages de l'utilisation des caissons de recompression

Toute plongée à des profondeurs supérieures 35 mètres et/ou avec des paliers de décompression nécessite la présence d'un caisson de recompression sur zone pour la marine et à moins de 2 heures pour l'armée de terre et la gendarmerie. La présence d'un caisson sur site permet de recomprimer en cas d'accident, mais également en cas d'incident lié au non respect du protocole (non respect des paliers par exemple).

- **Dispositifs immergés (bulles de plongée, systèmes de plongée…)**

Certains plongeurs militaires interviennent sous l'eau via des dispositifs immergés et tous sont formés à Saint-Mandrier (3 armées confondues).

Dans la Marine, cette pratique concerne uniquement la Cephismer où 20 plongeurs d'essais sont formés à faire ce type de plongée.

- **Apnée**

Dans la marine, l'apnée est pratiquée uniquement dans un processus de sélection et de formation des candidats. Il n'y a aucune perspective d'application opérationnelle de cette technique pour les militaires.

En formation, les PLB s'exercent à l'apnée statique à 6 mètres– 10 mètres et font également des exercices en apnée dynamique (l'élève apprend à tenir 30 secondes à 1 minute sans l'embout en bouche). Cette pratique est intéressante pour étudier l'aquaticité des candidats (aspect sélectif) mais également pour leur faire comprendre que la perte du détendeur laisse un peu de temps avant de manquer d'air (aspect pédagogique).

❖ ***Procédures d'intervention et procédures de secours***

Sécurité et soutien sanitaire

L'équipe sur le site pour encadrer les interventions est de 3 personnes minimum.

En situation normale, elle se compose d'un directeur de plongée en surface (DP) et de 2 plongeurs à l'eau. En situation dégradée, un superviseur se trouve en surface et le plongeur à l'eau peut intervenir seul, à conditions de respirer de l'air et de ne pas dépasser 12 mètres de profondeur. Pour la plongée aux recycleurs, il faut obligatoirement 2 plongeurs sanglés entre eux à l'eau. Dans

les cas où une équipe de secours est nécessaire, 2 plongeurs équipés des mêmes appareils se tiennent prêts à partir à l'eau.

Pour les interventions à des profondeurs inférieures à 35 mètres (plongées à l'air ou aux mélanges), il n'y a pas de plongeur de secours en surface. Pour les interventions à des profondeurs supérieures à 35 mètres aux mélanges, la présence d'une équipe de secours est requise.

Pendant les interventions, un médecin doit toujours être joignable au téléphone quelle que soit l'armée concernée ou la gendarmerie ; voire en fonction des plongées, la présence d'un infirmier et/ou d'un médecin sur place peut être requise.

Le matériel de secours comprend de l'oxygène, permettant de réaliser une oxygénothérapie en cas de besoin et également 1 ou 2 blocs d'air permettant de replonger pour faire les paliers de décompression en cas de remontée d'urgence par exemple. Les procédures de secours pour les plongées supérieures à 35 mètres ou avec paliers nécessitent du personnel formé à la mise en œuvre d'un caisson de recompression.

La sécurité et le soutien sanitaire sont plus importants en formation que lors des opérations (augmentation du nombre de caissons, médecins et infirmiers). En effet, statistiquement dans la marine, la majorité des incidents arrivent en formation (la marine entraîne ses plongeurs dans des conditions théoriquement plus drastiques que la réalité).

❖ *Maintenance et entretien du matériel*

Modalités de contrôle

Chaque unité de la Marine qui possède du matériel de plongée désigne un plongeur responsable chargé du suivi des dates de visites et de maintenance pour l'ensemble du matériel de plongée (détendeurs, bouteilles, brassières), excepté pour les recycleurs dont la visite annuelle est sous la responsabilité de chaque plongeur utilisateur (matériel individuel).

Pour permettre l'envoi de matériel en visite sans pénaliser le travail des plongeurs, la Marine met en place 30% de matériel supplémentaire par rapport au nombre de plongeurs (surcoût, mais permet d'être sûr que le matériel sera bien envoyé en visites).

Lors des visites annuelles des recycleurs, le plongeur vérifie entièrement son matériel. Pour la partie détendeur haute pression, la maintenance est sous-traitée à un industriel car les pièces sont celles en contact avec l'oxygène respiré et nécessitent une salle blanche pour le démontage. Le respect de la norme oxygène est complexe.

La maintenance des caissons de recompression est faite suivant 2 niveaux : le niveau 1, qui correspond à la maintenance de base faite par les utilisateurs (NC, PLD et les infirmiers) et le niveau 2, correspondant à des entretiens plus lourds, sous-traités par un industriel (la COMEX par exemple). Ces opérations de maintenance sont très précisément définies (listing des tâches). En cas d'avarie de matériel, il est nécessaire de prendre contact avec l'industriel qui se déplace pour faire la réparation.

Prophylaxie

Il n'y a pas d'obligation réglementaire de désinfecter les matériels à partir du moment où il n'y a pas d'échange de matériel**.** Les plongeurs de la Marine utilisent principalement du matériel individuel et s'échangent donc peu les parties en contact avec la bouche (détendeurs). Si nécessaire, des désinfectants sont mis à la disposition des plongeurs (approvisionnement des unités en solutions désinfectantes).

Dans le cas de plongée dans des eaux insalubres ou très chaudes, le matériel est rincé à l'eau et les opérateurs peuvent individuellement, s'ils le souhaitent, faire une désinfection complémentaire.

Dans le civil, une nouvelle recommandation préconise de mettre à disposition des bacs de décontamination, mais la mise en œuvre de cette mesure est compliquée. L'employeur met en

place la logistique nécessaire, mais l'opérateur ne suit pas nécessairement. Chez les PLB, il y a peu de sensibilisation à cette problématique. Les PLD qui utilisent du matériel individuel toute l'année sont plus sensibles à ces questions.

La tuyauterie des recycleurs n'a par ailleurs pas montré de contaminations particulières.

❖ ***Remarques de la profession***

Méthodes d'intervention

Recycleur

Pour garantir la sécurité des plongeurs militaires utilisant les recycleurs, plusieurs stratégies de protection sont mises en œuvre :

- L'utilisation de sangles d'embout et de couvres-lèvres qui permettent de garder l'embout en bouche en toutes circonstances (notamment en cas de perte de connaissance) ;
- La plongée systématique en binôme ;
- La plongée « sanglée » (sangle de 3 à 6 mètres) systématique en cas de plongée aux mélanges (recycleur) qui permet d'être en lien permanent avec son binôme pour par exemple l'assister en cas de problème.

La priorité en termes de sécurité d'usage des recycleurs, c'est l'étanchéité complète des voies respiratoires par l'utilisation d'une sangle d'embout et d'un couvre-lèvres. De par l'expérience dont bénéficient les militaires sur la plongée aux recycleurs en masse et la diversité d'accidents recensés (certains plongeurs ont été sauvés grâce à cela), l'utilité de ces systèmes est avérée. Les plongeurs utilisent volontiers ce dispositif.

Le travail « sanglé » n'est en revanche pas accessible à tous les types de plongées et nécessite un apprentissage long. Sans formation adaptée, cette pratique peut être dangereuse. Le rapport bénéfice/risque penche plutôt en défaveur d'étendre systématiquement cette pratique aux autres secteurs professionnels, mais peut être conseillée.

Organisation de la prévention

Contrôle des gaz

La phase de gonflage des bouteilles par les opérateurs est le point critique sur la question de la sureté de l'utilisation des gaz. C'est donc sur cette phase que doivent être axés les efforts.

Cela concerne aussi bien l'air comprimé produit par les compresseurs d'air que les mélanges gazeux transférés des racks vers les bouteilles de plongée.

Les nouvelles stations de gonflage sont capables de reconnaitre des bouteilles, préalablement marquées pour un mélange donné. La machine va alors identifier les bouteilles et le mélange correspondant et empêchera par exemple le gonflage de bouteilles à 30% d'oxygène au lieu de 50%.

2.6.2.4 Secours et sécurité[4]

Caractérisation de la population professionnelle

❖ ***Métiers représentés et répartition des effectifs***

Les travailleurs relevant de la mention B, catégorie « secours et sécurité » sont principalement les plongeurs de la Sécurité Civile (sapeurs-pompiers), mais également les plongeurs de la sécurité intérieure (policiers, douaniers, plongeurs du Ministère de l'intérieur). Le nombre total de travailleurs appartenant à cette catégorie est supérieur à 3000 plongeurs (D'après audition Sécurité civile, 2013).

Le nombre de travailleurs hyperbares de la Sécurité Civile représente 2 671 plongeurs opérationnels.

Les effectifs de la Sécurité Civile, mention B sont répartis de la manière suivante :

- Classe I : 1 047 Scaphandriers Autonomes Légers (SAL1) répartis dans les services départementaux d'incendie et de secours (SDIS), habilités à plonger jusqu'à 30 mètres.
- Classe II : 695 Scaphandriers Autonomes Légers répartis dans les SDIS dont les sites d'interventions sont supérieurs à 30 mètres (habilités à plonger jusqu'à 50 mètres).
- Classe II : 744 « Chef d'Unité Plongée » (SAL2) et 185 « Conseillers techniques » (SAL3) peuvent être amenés à réaliser des plongées d'incursion à 60 mètres suivant les procédures de sécurité suivantes : soit une plongée à l'air jusqu'à 60 mètres, obligatoirement accompagnée d'une décompression à l'oxygène ; soit une plongée avec emploi de Trimix normoxique entre 50 et 60 mètres.

Parmi la population de plongeurs sapeurs-pompiers, environ 20 plongeurs appartiennent au SSF (secours spéléo français). Le SSF est une association agréée de sécurité civile avec un plan de secours national qui peut être mis en œuvre au niveau de chaque département (D'après audition Sécurité civile, 2013).

La population compte peu de pompiers volontaires (environ 4% de l'effectif total).

❖ ***Age des travailleurs***

La moyenne d'âge des plongeurs sapeurs-pompiers est à 40 ans avec des extrêmes allant de 23 ans pour les plus jeunes jusqu'à 58 ans pour les plus âgés. Cette moyenne élevée s'explique par le fait que pour arriver à un haut niveau de plongée chez les sapeurs-pompiers, il est nécessaire d'avoir à son actif un nombre important de plongées et de formations (D'après audition Sécurité civile, 2013).

❖ ***Description de l'activité (type d'activité, fréquence d'intervention…)***

Sécurité civile (D'après audition Sécurité civile, 2013)

Les SAL1 assurent les fonctions de guide de palanquée. Lorsqu'ils sont « qualifiés 30 mètres », ils plongent à l'air jusqu'à 30 mètres de profondeur. Il s'agit d'une population qui va plonger en moyenne 25 fois par an. Lorsqu'ils sont « qualifiés 50 mètres », ils sont habilités à intervenir en

---

[4] Depuis la fin des travaux d'expertise, l'arrêté d'application du décret n° 2011-45 du 11 janvier 2011 pour les travailleurs de la mention B du domaine « secours et sécurité » a été publié : « Arrêté du 31 juillet 2014 relatif aux interventions secours et sécurité en milieu aquatique et hyperbare ».

plongée jusqu'à 50 mètres de profondeur. Dans ces conditions, ils plongent à l'air avec une décompression à l'oxygène recommandée.

Sous réserve d'avoir la qualification requise, les pompiers peuvent intervenir en plongée sous surface non libre (SNL) : plongée en galerie, sous la glace, dans des canalisations, épaves, parking souterrains immergés, grottes…

Les agents sont qualifiés suivant 2 niveaux : le niveau 1 (SNL1), qui correspond à une progression horizontale sous plafond limitée à 60 mètres et un niveau 2 (SNL2) vient d'être créé pour les départements dans lesquels la fréquentation des sites de spéléologie est importante (Aveyron, Lozère, Lot et Garonne, Pyrénées-Orientales) autorisant une progression horizontale sous plafond limitée à 200 mètres. Pour des interventions de secours au-delà de 200 mètres, on fait systématiquement appel au SSF.

Le SAL 2, qualifié 50 mètres, a pour mission d'encadrer une unité de plongée et de gérer les opérations de plongée courante en assurant la fonction de directeur de plongée. Il participe à l'enseignement de la plongée et peut également gérer une opération de surface non libre s'il est qualifié SNL. Il s'agit d'une population qui va plonger en moyenne 40 fois par an.

Le SAL3 assure la gestion de l'ensemble de l'équipe plongée du département d'affectation et assure le rôle de COH auprès du directeur départemental du SDIS d'affectation. Il occupe les fonctions de directeur de stage, est engagé en opérations particulières et dès que l'effectif de plongeurs est supérieur à 6 plongeurs sur une opération et en entrainement.

Les SAL2 et SAL3 plongent à l'air jusqu'à 50 mètres avec une décompression à l'oxygène recommandée. Au-delà de 50 mètres et jusqu'à 60 mètres, ils plongent soit à l'air avec décompression obligatoire à l'oxygène, soit au mélange Trimix normoxique dans la zone de 50 à 60 mètres. Ils peuvent également plonger au Nitrox avec les tables MT. Ils sont compétents pour intervenir au narguilé, dans la mesure où l'enseignement de cette technique fait partie de leur cursus de formation.

Un guide des techniques professionnelles définit l'ensemble des opérations que les sapeurs pompiers sont amenés à conduire dans le domaine concernant les interventions en milieu aquatique et/ou hyperbare, tant sur le plan opérationnel que sur le plan de la formation et des exercices.

Les plongées types sont des plongées d'incursion de courte durée (maximum de 30 min à 45 min) et géolocalisées. Ce sont des plongées dites « carrées » : descente sur le fond en modifiant très peu la profondeur. En amont, la préparation de la plongée est très précise, le périmètre est bien délimité et les manquements à la procédure sont facilement et rapidement identifiés par le directeur de plongée.

Au global, chaque plongeur sapeur-pompier intervient en moyenne 30 fois par an. La durée d'une carrière est en évolution et tend à diminuer. Jusqu'ici elle représentait environ 30 années de plongée avec 1000 opérations sur une carrière en moyenne et à l'extrême, 6000 plongées sur ces 30 ans d'exercice. La moyenne se situe actuellement aux environs de 20 ans de carrière.

Sécurité intérieure

Les douaniers, policiers et plongeurs du Ministère de l'intérieur (autre que sécurité civile) utilisent actuellement les nomenclatures définies par le Ministère du travail (Classe I, II et III).

Leur métier a pour activité principale la sécurité et l'aide à la population. Dans ce cadre, ils peuvent être amenés à utiliser leurs compétences dans le milieu subaquatique. Ils peuvent aussi être requis dans le cadre de procédures judiciaires (recherche d'armes, de cadavres ou toutes formes de preuves pour la justice).

❖ ***Formation du personnel***

Le niveau SAL1 est une compétence plongée de base, acquise via un cursus de formation de 5 semaines. Leurs compétences sont évaluées annuellement au travers de tests pratiques, d'une vérification de l'aptitude médicale et de la réalisation des 20 plongées annuelles minimum requises réparties sur l'ensemble de l'année. A l'issue d'une formation complémentaire d'une durée d'une semaine, les SAL1 peuvent être qualifiés pour intervenir en plongée jusqu'à 50 mètres de profondeur.

Les sapeurs-pompiers plongeurs peuvent suivre une formation de plongée SNL qui se décline en deux niveaux. La qualification SNL1 est obtenue à l'issue d'une formation d'une semaine et une semaine supplémentaire est nécessaire pour l'obtention du SNL2.

La formation en vue de l'obtention de la qualification Chef d'Unité plongée se déroule au Centre National de Plongée de l'ECASC et dure 4 semaines. La qualification Nitrox et Trimix est obtenue à la suite d'une semaine de formation complémentaire. Dans le cadre du maintien de ses acquis, le chef d'unité plongée doit obligatoirement participer à deux exercices par an regroupant les différents Chefs d'Unité au sein de chaque zone.

La formation en vue de l'obtention de la qualification de Conseillers techniques plongée se déroule au Centre National de Plongée de l'ECASC et dure 4 semaines. L'accès à cette formation nécessite d'être déjà Chef d'Unité. Les Conseillers techniques sont soumis à un recyclage obligatoire de 4 semaines tous les 5 ans au Centre National de plongée de l'ECASC.

Modalités de remise à niveau des personnels sur l'utilisation des matériels

L'ensemble des plongeurs de la sécurité civile sont soumis à des recyclages dont le programme porte également sur l'utilisation et l'entretien des équipements.

La fréquence maximale de plongées par plongeur, représente environ 40 plongées par an. Dans la réglementation de la sécurité civile, il est dit que la régularité des plongées participe à la sécurité des plongeurs et ce maximum est donc un objectif à atteindre pour rester opérationnel (parfois même dépassé). La répartition des plongées sur l'année doit se faire le plus régulièrement possible.

Si un plongeur n'a pas plongé depuis longtemps (retour de vacances, inaptitude, maladie…), l'armée impose une progressivité sur la reprise des plongées.

Traçabilité des parcours :

Le Centre National de Plongée de l'ECASC centralise toutes les données sur les plongeurs dans une base de données qui recense par plongeur entre autres les dates des contrôles et de délivrance des aptitudes.

<u>Intervention et exécution de travaux en milieu hyperbare (D'après audition Sécurité civile, 2013)</u>

❖ ***Nature des gaz utilisés***

➢ **Air comprimé**

L'air est utilisé jusqu'à 50 mètres de profondeur. Des plongées d'incursion à l'air sont possibles jusqu'à 60 mètres de profondeur, mais associées obligatoirement à une décompression à l'oxygène aux paliers.

➢ **Nitrox**

La population de sapeurs-pompiers plongeurs ayant reçu une formation à la plongée aux mélanges Nitrox représente un effectif de 400 personnes.

En formation, les sapeurs pompiers plongent en circuit-ouvert aux mélanges Nitrox fond à 40% et 30% d'oxygène. Les mélanges Nitrox ne sont pas utilisés en mélange fond lors des missions de sauvetage.

Les mélanges Nitrox à 70% d'oxygène (30% de N_2) sont utilisés ponctuellement en décompression lors de plongées en circuit ouvert.

- **Oxygène**

L'oxygène pur est utilisé en décompression. La décompression à l'oxygène n'est pas imposée pour l'instant mais dès la parution de l'arrêté d'application du décret de 2011 concernant les sapeurs-pompiers, elle sera rendue obligatoire pour des plongées dans la zone 50-60 mètres et recommandée pour des plongées dans la zone 40-50 mètres.

L'oxygène n'est actuellement pas utilisé en mélange fond.

- **Trimix**

La population de sapeurs-pompiers plongeurs ayant reçu une formation à la plongée aux mélanges Trimix représente un effectif de 34 personnes. Le trimix est utilisé uniquement en formation à l'ECASC.

Les mélanges Trimix à 18% d'oxygène sont utilisés en mélange fond pour plonger en circuit ouvert en association avec une décompression au Nitrox (70% d'O_2 / 30% de N_2) à partir de 12 mètres de profondeur.

Avantages de l'utilisation des mélanges respiratoires par rapport à l'air pour les travailleurs de la mention B

L'utilisation des mélanges permet d'éviter les risques de narcose à l'azote et permet de diminuer la pression du gaz dans les tissus à saturation.

Le Trimix présente l'avantage d'être un mélange qui n'impose pas d'équipement respiratoire spécifique. Par ailleurs, à 60 mètres, le plongeur se trouve à une profondeur équivalente air de 30 mètres, la lucidité est bien meilleure pour travailler.

Limites de l'utilisation des mélanges respiratoires par rapport à l'air pour les travailleurs de la mention B

L'utilisation des mélanges est complexe à mettre en œuvre (matériels et compétences spécifiques), plus onéreuse et expose les plongeurs aux risques d'accidents biochimiques.

Type de tables de décompression/ Ordinateurs utilisés

Ce sont les tables établies par le Ministère du travail modifiées 96.

Pour le Nitrox, sont utilisées les tables MT Air standard (en mélange fond) ou air-oxy 6 mètres (en décompression).

Pour le trimix normoxique, les sapeurs-pompiers utilisent les standards IANTD.

Les ordinateurs de plongée sont utilisés mais ne remplacent pas l'emploi des tables. L'ordinateur est utilisé pour l'enseignement et en cas d'accident puisqu'il permet une reprise de la décompression dans des conditions de sécurité.

Dans tous les cas, si les données de l'ordinateur sont moins contraignantes que celles de la table MT, ce sont les paramètres de la table de plongée qui sont pris en compte.

Mode de fabrication et modalités d'analyse des gaz :

La Sécurité Civile ne fabrique pas ses gaz, elle se fournit auprès d'un industriel. Un processus qualité garantit que la bouteille fournie a été remplie avec le bon gaz. Les bouteilles de gaz sont identifiées par des bagues de couleurs qui correspondent au gaz et à son pourcentage.

L'analyse du mélange respiratoire gazeux est systématique par le plongeur avant toute plongée et les résultats de ce contrôle sont reportés sur un registre spécifique.

❖ ***Méthodes d'intervention***

➢ **Narguilé**

Les Chefs d'Unité et Conseillers Techniques (960 plongeurs) l'utilisent dans le cadre de travaux sous-marins légers. Il s'agit d'une activité spécifique : l'ensemble du personnel plongeur est formé à cette technique mais sans la pratiquer au quotidien.

➢ **Scaphandre autonome (SCUBA)**

L'ensemble des sapeurs-pompiers plongeurs (2671 personnes) sont concernés par l'utilisation de cette technique, avec respiration d'air ou de mélanges.

➢ **Recycleur**

Les plongeurs de la Sécurité Civile n'utilisent pas le recycleur. Il s'agit d'un matériel trop spécifique pour être mis à disposition du collectif. Les missions de secours ne nécessitent pas de disposer d'une autonomie supérieure à celle qu'offre le SCUBA.

➢ **Caisson de recompression**

Le Centre national de plongée de l'ECASC est doté d'un caisson de recompression pour la formation des personnels plongeurs et du service médical (infirmiers et médecins) de plongée.

➢ **Apnée**

Au sein de la Sécurité Civile, l'apnée est intégrée au cursus de formations des plongeurs sapeurs-pompiers. Elle est notamment pratiquée dans le cadre d'un exercice de sauvetage (nage d'approche de 200m, suivie d'une apnée à 10 m avec récupération d'un mannequin et remorquage de celui-ci sur une distance de 100 m).

Tous les plongeurs SAL1, SAL2, SAL3 réalisent cette épreuve.

❖ ***Procédures d'intervention et procédures de secours***

Un briefing systématique est réalisé avant chaque plongée en entrainement, formation et en intervention.

Des procédures de rattrapage en cas de plongées non conformes sont mises en place et enseignées à tous les plongeurs.

La plongée « yoyo » (ou ludions) est réglementée :

- 2 « yoyos » autorisés jusqu'à 30 m ;
- 1 « yoyo » autorisé jusqu'à 50 m ;
- 0 « yoyo » autorisé jusqu'à 60 m (mesures spécifiques de sécurité mises en place).

Sécurité et soutien sanitaire

L'équipe sur le site pour encadrer les interventions est de 3 personnes minimum.

En situation normale, elle se compose d'un DP et de 2 plongeurs à l'eau. En situation dégradée, un superviseur secours se trouve en surface et le plongeur à l'eau peut intervenir seul, à condition de respirer de l'air et de ne pas dépasser 30 mètres de profondeur. Dans les cas où une équipe de secours est nécessaire, les 2 plongeurs à l'eau peuvent prendre la fonction de plongeurs secours.

Dans tous les cas, il y a un plongeur de secours en surface. Pour les interventions avec emploi de mélange et/ou surface non libre, le directeur de plongée détient obligatoirement les qualifications mélange et/ou surface non libre.

Pendant les interventions, un médecin doit toujours être joignable au téléphone et suivant la nature des plongées, la présence d'un infirmier sur place peut être requise.

La sécurité et le soutien sanitaire sont mis en place en fonction de l'environnement, du contexte de l'opération et de la nature des plongées.

En amont des chantiers, une phase d'analyse hors plongée est obligatoire. C'est le rôle du CPH (1 par département). Chaque département dispose d'un schéma départemental d'analyse des risques qui permet d'identifier toutes les situations à risques (présence de barrages, d'écluses, de lac en altitude…). A partir de cela sont établis des plans prévisionnels de prévention et pour chaque cas/site analysé, un plan de secours est élaboré (chaîne de secours : zone d'intervention, caisson, vecteurs).

Avant l'intervention des pompiers, une analyse doit déterminer si l'on est en situation normale ou dégradée. 24 modes dégradés ont été initialement prévus et enseignés aux pompiers pouvant être amenés à intervenir.

Le matériel de secours comprend de l'oxygène, permettant de réaliser une oxygénothérapie en cas de besoin et également 1 ou 2 blocs d'air permettant de faire les paliers en cas de remontée d'urgence par exemple.

Ces procédures de secours nécessitent du personnel formé à la mise en œuvre d'un caisson de recompression. Toute plongée à des profondeurs supérieures 30 mètres nécessite un caisson à moins d'une heure. Tous les SDIS de France disposent des coordonnées des caissons les plus proches et s'assurent de leurs disponibilités avant l'immersion des plongeurs nécessitant des procédures de décompression.

❖ ***Maintenance et entretien du matériel***

Modalités de contrôle

L'inspection visuelle des matériels est réalisée au sein de l'ECASC (présence de personnes qualifiées) mais dans toutes les autres structures, elle est sous-traitée. Les autres opérations de maintenance sont réalisées via des conventions mises en place avec les fournisseurs.

Des inspections visuelles annuelles des équipements sont réalisées, une requalification des blocs de plongée a lieu tous les 2 ans et une révision annuelle des détendeurs est imposée (avec démontage complet de l'appareil).

Prophylaxie

Les dispositions relatives à la désinfection des matériels sont les mêmes que pour le secteur de la défense.

❖ ***Remarques de la profession***

Gaz respiratoires

Nitrox

En opération, le Nitrox n'est pas utilisé en mélange fond. La plongée Nitrox de fond nécessite l'utilisation d'un biberon de secours (« pony ») en autonome (petite bouteille de mélange) et revêt un caractère dangereux pour les sapeurs-pompiers en mission de sauvetage, puisque cela les amène à respirer des mélanges suroxygénés à des profondeurs importantes et augmente les risques d'hyperoxie.

Il serait néanmoins possible de développer une utilisation courante du Nitrox en décompression. C'est une pratique intéressante notamment pour les plongées dans les eaux intérieures, les lacs et en altitude.

Trimix

Au sein de la population de plongeurs sapeurs-pompiers, il pourrait être intéressant de développer l'utilisation de mélanges Trimix par zone avec une formation ciblée de petites équipes (unité de 15 personnes). En effet, le mélange est constitué d'hélium, gaz très onéreux et la formation ainsi que l'actualisation des connaissances coûtent chers, alors que l'occurrence d'utilisation est faible. Il serait donc plus pertinent de mettre en place une formation ciblée d'un nombre restreint de personnes. La durée d'immersion envisagée avec ce type de mélange reste inférieure à 3 heures puisque les plongées des sapeurs-pompiers ne dépassent jamais 3 heures.

Méthodes d'intervention

Recycleur

Jusqu'ici cette technique n'était pas envisagée chez les sapeurs-pompiers. Son intérêt ne s'était pas fait ressentir.

D'une part, l'autonomie importante qu'offre l'appareil n'intéresse pas particulièrement les pompiers qui font majoritairement des plongées planifiées avec des durées d'intervention qui ne nécessitent pas ce niveau d'autonomie.

D'autre part, la rigueur nécessaire pour entretenir l'appareil et sa technicité sont *a priori* difficilement compatibles avec l'actuelle mise aux normes européennes en termes de durées de travail des agents qui tend notamment à diminuer les temps de formation des personnels. Il y a pourtant un historique important de l'utilisation de ce type d'appareils chez les sapeurs-pompiers avec les équipes de reconnaissance longue durée dans les tunnels (à sec) qui sont par ailleurs, souvent, des sapeurs-pompiers plongeurs. Mais pour les activités de secours, il n'est pas nécessaire de bénéficier d'un temps d'intervention très long.

L'intérêt d'utiliser le recycleur dépend des profils de plongées. La volonté actuelle n'est pas à la banalisation de l'emploi du recycleur chez tous les plongeurs sapeurs-pompiers, mais plutôt de limiter la mise en œuvre de pratiques et matériels plus techniques (notamment l'emploi de trimix normoxique voire du recycleur) à certaines équipes restreintes par zones (9 zones sur le territoire national : 7 zones en métropole, 1 zone sur les DOM-TOM, 1 sur l'océan indien). L'idée est de constituer par zone, une équipe qui mettrait en œuvre ces techniques plus pointues. La zone de plongée resterait limitée à 60 mètres de profondeur.

Apnée

Les plongeurs sapeurs-pompiers ont fait beaucoup d'apnée. D'une part, l'apnée est intégrée dans les épreuves du cursus de formation (profondeur de 10 mètres) et d'autre part, cette pratique présente un intérêt opérationnel dans la mesure où les sauveteurs aquatiques la mettent en œuvre régulièrement dans 3 mètres d'eau, pour faire des recherches en attendant l'arrivée des secours et elle peut également s'avérer utile dans le cas de sauvetages à une profondeur de 10 mètres. A

noter que ces pratiques sont concernées par le décret qui s'applique à partir d'un mètre de profondeur.

La pratique de l'apnée peut être à l'origine d'accidents barotraumatiques en lien avec un mauvais équilibrage des oreilles. Un cas de syncope hypoxique a été recensé. La pratique de cette activité doit être associée à la mise en place d'un échauffement et d'une surveillance particulière. Lors des tests d'apnée en formation, l'épreuve est encadrée et surveillée par un plongeur à 10 m, un plongeur à 5 m et une équipe de sécurité en surface. L'embarcation de surveillance est dotée d'un défibrillateur. Il est par ailleurs interdit de plonger en apnée après toute plongée bouteille (défini dans le code de la plongée).

Organisation de la prévention

Pour garantir la sécurité des sapeurs-pompiers plongeurs, plusieurs stratégies de protection sont mises en œuvre :

- L'utilisation d'une sangle d'embout (ou tour de cou) est rendue obligatoire pour tous les plongeurs ;
- La plongée systématique en binôme ;
- La plongée au touche-contact obligatoire en cas de visibilité réduite et/ou nulle.

Prophylaxie

Des mesures générales de prophylaxie sont mises en place progressivement par le biais de campagnes de sensibilisation des personnels, mais dans la pratique, peu réalisées. Une marge de progression importante demeure sur ce plan. En revanche, le matériel est individualisé, le personnel très bien suivi médicalement et systématiquement vacciné contre la leptospirose et les hépatites.

Il faudrait équiper les unités avec un bac de désinfectant et définir un protocole précis de désinfection des matériels. Certaines circonstances devraient imposer des protocoles de désinfection à mettre en œuvre, par exemple après une plongée dans des eaux stagnantes. Il ne semble pas pertinent de mettre en place une désinfection systématique, après chaque plongée qui apparaitrait comme contraignante et n'inciterait pas les plongeurs à suivre ces préconisations.

2.6.2.5 La plongée scientifique

Caractérisation de la population professionnelle

❖ ***Métiers représentés et répartition des effectifs***

Les travailleurs relevant de la mention B, catégorie « plongée scientifique » sont des plongeurs scientifiques.

En France, cette population représente environ 250 plongeurs actifs (CNRS, CNRS-Institut national des sciences de l'univers (INSU), Universités, IRD, IFREMER…) d'après une estimation Colimpha, l'Association Française des Plongeurs Scientifiques.

Les plongeurs sont classés pour les deux tiers dans la mention B, classe II et appartiennent pour le dernier tiers à la mention B, classe I. Quelques exceptions sont issues de la mention A, classe II ou de la mention B, classe III.

Le nombre de plongeurs de la classe II évolue puisque des demandes d'équivalence sont en cours afin de faire passer les plongeurs de la classe I en classe II. Ceci est lié au fait que 95% des plongées se font entre 0 et 40 mètres et qu'avec la limitation de la classe I à 30 mètres instaurée par le nouveau décret, il manque des plongeurs qualifiés réglementairement pour descendre à 40 mètres.

❖ *Age des travailleurs*

Ces métiers comptent beaucoup de plongeurs âgés de plus de 40 ans (la moyenne étant estimée à 45 ± 10 ans) avec des extrêmes allant de 20 ans pour les plus jeunes à 70 ans pour les plus âgés (D'après les auditions CNRS, IFREMER et IRD, 2013).

❖ *Description de l'activité (type d'activité, fréquence d'intervention…)*

Le plongeur scientifique opère sous l'eau des prélèvements ponctuels d'organismes vivants et de sédiments, installe des dispositifs expérimentaux et instruments de mesures ou réalise des observations directes notamment dans le cadre de l'étude des écosystèmes marins.

Deux profils de plongeurs scientifiques sont représentés au sein de cette population :

- Les chercheurs pour lesquels la plongée est un outil de recherche et dont la plongée n'est pas le cœur de métier (60% des effectifs).
- Les techniciens, assistants ingénieurs et ingénieurs plongeurs dont c'est le métier de plonger (40% des effectifs) et qui sont donc des plongeurs confirmés.

Les zones d'intervention sont assez aléatoires. Les plongeurs peuvent être amenés à plonger dans la mer ouverte, les lagunes, sous plafond, près de sources de pollutions (rejets, égouts) ou dans des conditions de turbidité particulière (ex: Golfe de Fos, eaux du Golfe du Lion).

La grande majorité des plongées se fait dans la zone 0-40 mètres. Les plongées ont lieu à une profondeur moyenne de 20 mètres avec un maximum de 60 mètres. La durée d'immersion s'étend de 30 à 60 min. En France métropolitaine, la majorité des interventions "profondes" (40-60m) se déroulent en Méditerranée. Les plongées entre 40 et 60 mètres sont en proportion peu fréquentes, bien que les besoins scientifiques existent (D'après les auditions CNRS, IFREMER et IRD, 2013).

Les chantiers sont de taille variable (de 2 à une vingtaine de plongeurs). Les plongeurs scientifiques sont amenés à réaliser des types d'intervention divers : lourde, précise, statique, en déplacement, localisée, couvrant parfois plusieurs milliers de m^2. Pour cela, différents moyens à la mer et matériels de plongée sont disponibles : les moyens « lourds » (navire, caisson, *etc*) permettant de disposer d'un environnement adapté et d'explorer des destinations éloignées et les moyens « légers » et équipements nécessaires pour travailler à proximité d'infrastructures à terre (D'après les auditions CNRS, IFREMER et IRD, 2013).

Dans la zone de 0 à 50 mètres, ils interviennent fréquemment au SCUBA (>90% des cas) en respirant de l'air avec des durées d'intervention allant de 45 à 60 min par plongée. Le narguilé peut également être utilisé mais de manière plus anecdotique (< 10% des cas).

La décompression peut être optimisée à l'oxygène pur ou au Nitrox pour les plongées à 40-50 mètres.

Les plongeurs scientifiques travaillent en moyenne plus de 25 ans. Certains plongent pendant toute leur vie professionnelle.

Les plongeurs dont la plongée n'est pas le cœur de métier interviennent en moyenne sur 20 à 30 plongées annuelles. Sur une carrière, ils arrivent à un nombre d'interventions de 500. Pour les plongeurs dont c'est le métier, la moyenne se situe plutôt autour de 100 à 150 plongées annuelles avec des maximums atteignant 200 plongées à l'année pour les plongeurs de station marine par exemple. Ils plongent en moyenne 3000 fois au cours de leur carrière (D'après les auditions CNRS, IFREMER et IRD, 2013).

Au CNRS, un minimum annuel de plongées est requis pour rester opérationnel, il est instauré à 12 plongées dont 6 plongées à caractère scientifique.

❖ ***Formation du personnel***

La formation des plongeurs scientifiques au CAH mention B classe I ou II a lieu pour partie en centre agréé (INPP, DRASSM…). Selon les modalités du décret, elle est également possible par commission d'équivalence (concerne la majorité des plongeurs). En effet, beaucoup de plongeurs sont issus de formations « loisir » et passent des équivalences en faisant valoir leur expérience de la plongée.

Modalités de remise à niveau des personnels sur l'utilisation des matériels

Il n'y a pas de remise à niveau des connaissances organisée de manière codifiée à ce jour au niveau de l'activité professionnelle.

Cette remise à niveau est aléatoire suivant les organismes scientifiques et en fonction des plongeurs.

Traçabilité des parcours

La traçabilité des plongées est assurée par le remplissage d'une feuille de mer sous format papier. Ces feuilles servent par ailleurs à la justification des interventions de plongée et permettent aux plongeurs de toucher les primes à la mer.

Intervention et exécution de travaux en milieu hyperbare (D'après les auditions CNRS, IFREMER et IRD, 2013)

❖ ***Nature des gaz utilisés***

➢ **Air comprimé**

L'air est utilisé par 100% des personnes et concerne la grande majorité des plongées qui sont réalisées le plus couramment à des profondeurs de 40 mètres et moins.

➢ **Oxygène**

L'oxygène est utilisé en décompression aux paliers (6 mètres) lors des plongées à l'air (tables air-oxy-6 mètres : 1,6 bar P_PO_2) dans le cadre de plongées carrées ou plus à risque (avec effort). Ces plongées sont plus rares et concernent peu de plongeurs. Elles correspondent à des interventions longues à profondeur moyenne (20 à 30m) ou plus courtes à 45-50 mètres.

➢ **Nitrox**

Les mélanges Nitrox ne sont pas utilisés par tous les organismes scientifiques.

Le cas échéant, l'usage de mélanges Nitrox est fait en décompression essentiellement (optimisation de la décompression pour les plongées à 40-50 mètres), voire en utilisation en tant que mélange fond, mais dans le cadre de plongées de faible profondeur (0 - 30 mètres).

Les mélanges utilisés peuvent être des Nitrox de 21 à 40% d'oxygène en mélange fond et à 70 ou 75% d'oxygène en décompression.

➢ **Trimix**

Les mélanges Trimix ne sont pas utilisés par tous les organismes scientifiques (< 10%).

Le cas échéant, la teneur en oxygène de ces mélanges est adaptée suivant le type de plongée.

Avantages de l'utilisation des mélanges respiratoires par rapport à l'air pour les travailleurs de la mention B

La décompression à l'oxygène permet d'augmenter la sécurité des plongeurs et améliore la désaturation.

L'utilisation d'un mélange Nitrox permet d'augmenter la sécurité des plongeurs et améliore la saturation et la désaturation.

Dans certaines structures, le Nitrox est préféré à l'oxygène en décompression car il peut être utilisé plus rapidement, avant 6 mètres de profondeur.

Les conditions dans lesquelles les plongeurs concernés interviennent ne sont pas nécessairement des zones avec du courant, mais en revanche, ce sont des milieux où une très forte houle peut être présente et pour lesquels une décompression à 3 mètres est très inconfortable, ceci explique l'intérêt de pouvoir faire de la décompression plus profonde avec un mélange Nitrox.

L'utilisation de mélanges Trimix permet aux plongeurs de descendre à plus de 60 mètres de profondeur, limite de l'air en lien avec sa toxicité à cette profondeur.

Limites de l'utilisation des mélanges respiratoires par rapport à l'air pour les travailleurs de la mention B

Les limites de l'utilisation des mélanges Trimix sont liées aux volumes importants de gaz transportés sous l'eau, rendant non opérationnelles des plongées nécessitant un engagement technique trop important, ou à la création de situations de suréquipement qui constituent des facteurs de risques d'accidents.

Type de tables de décompression/ Ordinateurs utilisés

Pour la plongée à l'air les plongeurs utilisent les tables MT.

Lorsque les plongeurs font une décompression à l'oxygène, ils utilisent la table MT, air-oxy 6 mètres, jamais d'ordinateur de plongée.

En revanche, sur les autres types d'interventions plus courtes et moins profondes, qu'il est difficile de planifier précisément, les plongeurs scientifiques utilisent des ordinateurs de plongée. De la même façon, si les paliers de décompression ne sont pas effectués à l'oxygène, les plongeurs utilisent un ordinateur.

L'utilisation des ordinateurs de plongée est néanmoins limitée, car il n'existe pas d'ordinateurs qui intègrent ces tables MT.

Mode de fabrication et modalités d'analyse des gaz :

L'air comprimé est fabriqué par des compresseurs.

Le gonflage des gaz peut être suivant les organismes, sous-traité *via* l'achat de bouteilles dont le remplissage est réalisé par des prestataires de services agréés (le plus souvent) ou directement réalisé sur place.

Les gaz et mélanges respiratoires sont systématiquement analysés avant plongée.

Pour des questions de traçabilité, les bouteilles de gaz sont identifiées avec sur chaque bouteille une pastille de couleur et des informations sur le contenu (date de préparation, qualité du mélange, plongeur maximale d'utilisation…).

❖ ***Méthodes d'intervention***

➢ **Narguilé**

Dans la zone de 0 à 50 mètres, le narguilé peut être utilisé mais de manière anecdotique (< 10% des cas).

➢ **Scaphandre autonome (SCUBA)**

Dans la zone de 0 à 50 mètres, le SCUBA est la méthode de référence (>90% des cas) en respirant de l'air avec des durées d'intervention allant de 45 à 60 min par plongée.

Avantages de l'utilisation du SCUBA

Les avantages du SCUBA en circuit ouvert sont sa facilité de mise en œuvre et le fait que c'est une pratique relativement peu onéreuse dans le cas de plongée à l'air.

Inconvénients de l'utilisation du SCUBA

L'autonomie de l'appareil est limitée par le besoin d'approvisionnement en gaz respiratoires.

➢ **Recycleur**

Pour le moment, l'utilisation de ces appareils n'est pas prévue par la réglementation spécifique aux travailleurs de cette catégorie (plongeurs scientifiques : arrêté du 30 octobre 2012).

Néanmoins, certains instituts bénéficient d'autorisations spéciales d'utiliser les recycleurs dans le cadre de projets d'exploration scientifique, sous couvert de la justification que dans certaines conditions, l'utilisation des recycleurs est avantageuse et plus sécuritaire pour les travailleurs.

Il pourrait être intéressant de modifier cet arrêté afin d'ouvrir la mise en œuvre de cette technique aux plongeurs scientifiques.

Avantages de l'utilisation du recycleur

Le recycleur présente des avantages pour le plongeur scientifique parmi lesquels ; la furtivité, l'intervention silencieuse, la charge réduite en gaz inerte, l'optimisation de la décompression (la PpO_2 augmente durant toute la remontée) et l'absence de changement de gaz lors de la décompression.

Inconvénients de l'utilisation du recycleur

C'est un appareil complexe dont la bonne maîtrise nécessite une solide formation et une pratique régulière. La maintenance et l'entretien de cet appareil doivent également être très rigoureux.

➢ **Apnée**

L'apnée n'est pas mise en œuvre mais si cette pratique bénéficie d'un encadrement réglementaire, sa pratique pourrait concerner 20 à 30 % des plongeurs scientifiques.

Avantages de la mise en œuvre de l'apnée

Les interventions à petites profondeurs sont souvent plus faciles à réaliser en apnée.

Inconvénients de la mise en œuvre de l'apnée

La pratique de l'apnée est limitée par plusieurs facteurs : la clarté de l'eau, les conditions météorologiques, la température, la condition physique des plongeurs...

❖ *Procédures d'intervention et procédures de secours*

Equipe minimale sur le site (pour encadrer les interventions)

Lors d'une intervention de plongée scientifique en règle générale, le travail est réparti entre les personnes affectées à l'opération et à l'aide de l'opérateur (noter, porter le matériel). Un surveillant de surface est obligatoirement présent. Pour assurer la sécurité, la deuxième palanquée reste en surface dans le cas de plongées profondes, avant de plonger à son tour (amélioration du temps de réaction en cas d'accident, car pas de rappel de plongeurs).

La plupart du temps, seulement 3 ou 4 plongeurs sont disponibles pour participer à une intervention. La législation actuelle laisse une marge de manœuvre, permettant de restreindre les équipes tout en respectant les exigences réglementaires avec des rotations des titres/fonctions et cumul des titres.

❖ *Maintenance et entretien du matériel*

Modalités de contrôle

La vérification des bouteilles de gaz est faite par les centres agréés de ré-épreuves.

Le contrôle des casques, détendeurs, bouteilles et robinetterie est à moduler selon le type de matériel, les usages, la sensibilité et la capacité de protection. La maintenance des appareils est sous-traitée au maximum, les instituts sont en effet tenus de fournir des certificats pour justifier de la maintenance des EPI.

Des réparations sont possibles en local avec les techniciens, mais jamais pour des réparations pouvant mettre en jeu la sécurité et demandant une certification.

Prophylaxie

La plupart du matériel est personnel, hormis pour les jeunes plongeurs (stagiaires). Il n'y a pas de procédure systématique de désinfection du matériel, sauf lorsque le matériel est collectif.

Les plongeurs peuvent utiliser du désinfectant pour la boucle respiratoire. Les désinfections sont faites par cycle, excepté en zone tropicale où les eaux sont chaudes et où les désinfections sont quotidiennes.

❖ *Remarques de la profession*

Réglementation

Les activités de plongée scientifique ont souvent lieu entre 0 et 40 mètres de profondeur. Les plongées scientifiques commencent à être sous-traitées auprès d'associations. Le nouveau décret restreint les profondeurs de plongée pour les travailleurs de la mention B :

- Mention B, classe I : limitation à 30 mètres
- Mention B, classe II : limitation à 50 mètres

Les plongeurs recrutés au niveau des associations sont là pour assurer le respect de la réglementation en termes de nombres de plongeurs et des fonctions imposées sur un chantier de plongée (plongeurs secours en surface, photographes…).

Gaz respiratoires

Oxygène en décompression

Les plongeurs du CNRS respectent les exigences réglementaires pour la décompression à l'oxygène aux paliers, mais il leur est quelque fois possible d'utiliser un biberon de secours, en décompression à 6 mètres. En effet, lors d'une intervention près des rochers par exemple, le fait de porter la pony sur soi présente plus de sécurité que d'avoir à la chercher sur un ancrage lourd

dont on peut s'être éloigné (courant, visibilité). Le choix de la méthode dépend des conditions de plongée (travail à faire, nombre de plongeurs disponibles…).

Nitrox

Les plongeurs du CNRS souhaiteraient en grande majorité pouvoir plonger au Nitrox (22% à 40% d'oxygène) en mélange fond, sous réserve d'une formation adaptée du personnel (formation / équivalences sécurité) et de l'acquisition du matériel nécessaire, pour aller plonger dans les tranches de profondeurs adaptées (20 à 45 mètres) en améliorant la sécurité et en diminuant la fatigue. Les scientifiques souhaitent pouvoir conserver un profil de plongée « air », mais en utilisant des mélanges fond Nitrox qui offrent des conditions de décompressions avantageuses en termes de durée de paliers et induisent beaucoup moins de fatigue lorsqu'ils sont associés à un profil de décompression « air » (sans compter que la profondeur équivalente en termes de charge d'azote est réduite d'autant). La fatigue est diminuée et les plongeurs pourraient augmenter leur nombre de plongées dans le cadre d'une mission précise. Cela va dans le sens de la sécurité.

Les plongeurs scientifiques du CNRS seraient donc intéressés par une banalisation de l'utilisation du Nitrox surtout dans la zone des 20 à 35 mètres.

L'utilisation de mélanges Nitrox couplée à un recycleur, serait également souhaitable pour certaines plongées, notamment sous plafond (grottes sous marines) pour limiter l'impact des bulles sur certains organismes fragiles présents dans ces environnements. Mais il n'est pas évident de trouver les moyens financiers et humains d'assurer la maintenance ce type de matériel dans les laboratoires.

Les personnels CNRS seraient aussi intéressés pour faire des paliers au Nitrox à 80% d'oxygène qui permettent de commencer les paliers à 9 mètres en étant encore à une PpO_2 inférieure à 1,6 et qui est plus facile à approvisionner et moins couteux que l'oxygène pur. Cela impliquerait l'utilisation d'autres tables que les MT.

En circuit ouvert avec respiration de mélanges Nitrox, les profondeurs et durées d'utilisation sont limitées. Une typologie d'accidents est propre aux plongeurs Nitrox en circuit ouvert et des recommandations et précautions d'utilisation sont nécessaires.

Pour une utilisation avec le recycleur, éviter les activités à risques : progression à contre courant, manutention, manipulation d'instruments lourds, *etc*., toutes activités ou conditions environnementales nécessitant un effort physique important.

Trimix

L'usage du Trimix ouvre des perspectives en termes de durée d'immersion et présente également des avantages sécuritaires offrant notamment un meilleur confort de plongée (température du gaz respiré, *etc.*).

L'utilisation de mélanges Trimix permettrait d'accéder plus confortablement à des profondeurs non accessibles à l'air (60-70 mètres) et à d'autres profondeurs qui ne permettent pas encore de justifier de mobiliser un ROV (70-100 mètres). D'autant que le robot ne peut pas remplacer le regard et la main du plongeur biologiste. Ces tranches de profondeurs sont assez mal connues et n'ont été visitées à l'air que par quelques plongeurs scientifiques ou récemment par des cabinets d'étude qui se sont spécialisés dans ce domaine. Il y aurait donc un grand intérêt à permettre à de vrais biologistes de se former et de plonger aux mélanges entre 60 et 100 mètres.

Les mélanges Trimix pourraient présenter un intérêt sur des incursions courtes profondes dans la tranche 50-70 mètres pour aller chercher ou déposer un capteur, faire un prélèvement ponctuel… Du point de vue de la sécurité, ils permettent aux plongeurs de garder l'esprit clair par la diminution des risques liés à la narcose à l'azote.

Certains plongeurs scientifiques estiment que l'usage du Trimix en configuration adaptée pourrait permettre d'explorer et de travailler dans une zone plus profonde que 70 mètres, tout en restant inférieur à 90-100 mètres.

Il faut encore que les laboratoires de recherche aient les moyens financiers, matériels et humains de gérer ce type de plongée : hommes de surface pour les lignes de décompression, approvisionnement en mélange et gestion de l'équipement.

Méthodes d'intervention

Recycleur

Si l'utilisation des recycleurs est ouverte aux plongeurs scientifiques, elle devrait concerner 10 à 15 % des effectifs : plongées lointaines et profondes 50-100 mètres, équipes faisant du comptage de poissons ou des études de comportement en zone côtière, photographes (notamment puisque cet appareil ne produit pas de bulles).

Un autre avantage de l'utilisation du recycleur est qu'il peut s'avérer être un outil sécuritaire et de prévention des accidents de décompression notamment lorsque la chaîne des secours n'est pas simple à mettre en œuvre (plongée dans des zones reculées).

Ce sont des appareils complexes qui semblent fiables d'utilisation à partir du moment où on maitrise parfaitement la précision de la technique. Ils nécessitent une formation spécifique sérieuse et une pratique régulière pour plonger en sécurité. Se pose la question de la pertinence d'utiliser cette technique pour les plongeurs scientifiques dont la plongée n'est pas le cœur de métier et qui ont beaucoup d'autres activités à côté. Par ailleurs, certains travailleurs sont par exemple amenés à plonger dans des conditions moins favorables qu'en Méditerranée avec beaucoup de courant, une moins bonne visibilité et dans le cas de plongeurs qui ne pratiqueraient pas régulièrement, cette technique est dangereuse.

Apnée

Cette pratique n'est actuellement pas réglementée. Elle est plutôt mise en œuvre par des petites structures telles que bureaux d'études et associations, pour immersion sur des petits fonds (inférieurs à 12 mètres).

Pour les plongeurs scientifiques, une ouverture sur cette pratique dans la zone 0 à 10 mètres serait intéressante pour l'observation, la prise d'échantillons, la maintenance de matériels (capteurs de surfaces à nettoyer…). La durée des séquences de travail serait relativement courte, excepté dans le cas de la réalisation de cartographies d'habitats où les plongeurs peuvent rester plusieurs heures dans l'eau d'affilée à nager pour vérifier les profondeurs par exemple (sondeur à main). Une personne peut travailler 1 à 2 heures dans ces conditions avec un nombre d'immersion estimé grossièrement à 10 par heure. Les plongeurs associatifs recrutés pour ce type de travaux plongent parfois seuls. Un travail systématique en binôme alternant serait à préconiser pour la pratique de l'apnée.

Autoriser la pratique de l'apnée permettrait d'éviter de mobiliser inutilement des grosses équipes (personnels et matériels) sur des interventions qui peuvent être réalisées en toute sécurité de manière plus simple et efficace.

Certains scientifiques souhaiteraient pérenniser la pratique de l'apnée scientifique jusqu'à 20 mètres de profondeur. Ils insistent néanmoins sur le fait que si l'apnée est déjà intégrée dans la formation de plongée au scaphandre autonome, une épreuve à 10 mètres de profondeur ne peut en aucun cas justifier de la compétence ni de la maîtrise de l'activité apnée. C'est à ce niveau que se situe le danger, dès lors qu'un plongeur scaphandre utilisera l'apnée sans être formé et qu'il progressera en profondeur pour travailler. Ces scientifiques prônent par exemple la mise en place d'une classe B qui serait spécifique à l'apnée dans le cadre du décret, afin de définir un cadre à la pratique de l'apnée, et ainsi se diriger vers un réel développement de l'activité au plan professionnel.

Robots ou véhicules sous-marins télé-opérés (ROV)

L'utilisation des robots de fond télé-opérés se développe considérablement. Ils permettent de faire des prélèvements et observations depuis la surface. La principale difficulté concerne la gestion du câble électro-opto-porteur qui les relie à la surface et assure l'alimentation du robot en énergie.

Au-delà de 70 mètres de profondeur, certains scientifiques préconisent d'utiliser les ROVs plutôt que d'envoyer des plongeurs. En termes d'observations c'est un outil idéal, puisque les techniques vidéo et photographiques ont beaucoup évolué augmentant considérablement la qualité des observations. En revanche, certaines manipulations et prélèvements ne peuvent être réalisés correctement que par la main de l'homme, c'est la limite des appareils actuels.

Dans le pilotage d'un ROV, à partir du moment où le matériel est de qualité, c'est l'opérateur qui est la clé. Il est pertinent que l'opérateur ait une connaissance poussée du matériel et qu'il puisse notamment gérer les problèmes et réparer les pannes qui pourraient survenir.

Organisation de la prévention

Traçabilité des parcours

Il serait pertinent de mettre en place une traçabilité centralisée des opérations de plongée scientifique au sein des différents organismes employant des plongeurs scientifiques, voire à l'échelle nationale (rôle de l'ingénieur sécurité).

Irrégularité des plongées

Un accident récent (milieu associatif scientifique) a remis au centre du débat le problème de manque d'entrainement des travailleurs après un arrêt prolongé des activités de plongée. Si l'intervalle de temps entre 2 plongées est très long, il n'y a pas de progressivité imposée pour la reprise des interventions. Il faut recommander des plongées de réhabilitation qui permettent de retrouver des sensations.

2.6.3 Mention C

2.6.3.1 Caractérisation de la population professionnelle

Métiers représentés et répartition des effectifs

Les travailleurs relevant de la mention C, sont les « hyperbaristes médicaux ». Ce sont des personnels médicaux et paramédicaux (médecins, infirmiers, aides-soignants, techniciens...) affectés à la mise en œuvre des installations hyperbares médicales (chambres thérapeutiques hyperbares et caissons de recompression).

Il y a 23 centres de médecine hyperbare en France avec en moyenne 10 hyperbaristes par centre. Selon les centres, 3 ou 4 médecins (y compris remplaçants) assurent le fonctionnement des unités. Le personnel paramédical (manipulateurs et/ou infirmiers ayant le certificat d'aptitude à l'hyperbarie) est en moyenne au nombre de 6 ETP par centre. Au niveau national, ces personnels représentent donc environ 400 personnes (D'après les auditions du SSA, 2013).

Parmi ces personnels, certains sont des civils (personnel des hôpitaux et sapeurs-pompiers), et d'autres des militaires. Il y a 3 centres hyperbares du Service de Santé des Armées (SSA) en France : Toulon, Paris et Metz. La population professionnelle du SSA comprend le personnel hospitalier et le personnel opérationnel. Les activités du personnel opérationnel appartenant à la mention C sont décrites dans le paragraphe défense, mention B.

Age des travailleurs

Les âges diffèrent suivant la fonction assurée au sein du service de médecine hyperbare.

Pour prendre l'exemple du personnel du service de médecine hyperbare de l'hôpital du Val de Grâce (VDG), les médecins sont âgés de 45 ans en moyenne et les infirmiers ont autour de 25 ans. La moyenne d'âge dans le service est d'environ 40 ans. Les travailleurs du service font (à eux tous) environ 200 mise en pression par an, mais le nombre diffère suivant les postes.

Description de l'activité (type d'activité, fréquence d'intervention…)

Les hyperbaristes médicaux sont amenés à mettre en œuvre des chambres hyperbares à usage thérapeutique ou des caissons de recompression de chantier.

La mise en pression du caisson se fait le plus souvent avec un infirmier (dès que les patients sont branchés, l'infirmier ressort). Après la première séance au cours de laquelle les patients bénéficient d'une instruction par un infirmier, ils sont souvent mis en pression seuls (entre eux, non accompagnés par un personnel classé) (D'après les auditions du SSA, 2013).

L'accompagnement demeure néanmoins fonction de l'état clinique du patient. Un patient intubé et ventilé sera accompagné pendant toute la durée du séjour en pression soit par un médecin, soit par un infirmier. Lors d'un ADD, la mise en pression se fait nécessairement en présence d'un médecin pour refaire des examens une fois au fond.

Lors d'un séjour en pression, l'accompagnateur reste le plus souvent à l'air, mais il a la possibilité de faire des paliers de décompression à l'oxygène pour améliorer la remontée. Les expositions se font dans le respect des tables la plupart du temps (D'après les auditions du SSA, 2013).

En moyenne, 3 à 4 séances sont organisées chaque jour en chambre thérapeutique hyperbare, à raison de 10 patients maximum par intervention, ce qui représente entre 10 à 20 personnes traitées quotidiennement. La fréquence annuelle d'utilisation des caissons dépasse les 700 compressions.

La pression habituelle pour les traitements chroniques est de 2,5 ATA ce qui correspond en immersion à une profondeur de 15 mètres (entre 12 et 18 mètres dans la pratique). La pression maximale appliquée est de 4 ATA (30 mètres) (D'après les auditions du SSA, 2013).

La haute autorité de santé (HAS) en 2007 a défini une séance d'oxygénothérapie comme étant de l'oxygène délivré à une pression supérieure à la pression atmosphérique pendant un temps

minimum de 100 minutes. Pour des raisons médicales, le médecin peut être amené à délivrer plus ou moins longtemps de l'oxygène.

Pour un accident de désaturation grave, les soignants préconiseront plutôt une table profonde, longue et précoce : table à 30 mètres avec une durée maximale de 7h30 à 8 heures (durée maximum classique d'une table thérapeutique) (D'après les auditions du SSA, 2013).

Pour des pathologies graves, pour lesquelles l'état clinique du patient n'est pas stable, il peut être pertinent de faire une séance à seulement 70 minutes (D'après les auditions du SSA, 2013).

Fréquence d'intervention du personnel

Le décret limite à 2 par jour pour le personnel le nombre d'interventions en milieu hyperbare par 24 heures (voire 3 interventions en cas d'urgence, sur décision et sous la responsabilité du médecin). Avec une durée maximum cumulée de 3h maximum par 24h en incursion.

Pressions maximales autorisées

En France, les séjours en pression dans un caisson hyperbare sont autorisés jusqu'à une pression de 6 ATA maximum (profondeur de 50 mètres en immersion). Des tables thérapeutiques persistent encore pour de telles pressions, mais elles sont dans la pratique rarement mises en œuvre et devraient être évitées. Le fait de subir cette pression entraine une prise de risque pour le personnel qui séjourne en pression avec le patient, une prise de risque pour le patient lui-même et un risque lié à l'absence d'un accompagnant dans le caisson avec le patient.

Dans la pratique, la plupart des interventions pour des pathologies aigues ont lieu à une pression maximum de 4 ATA (30 mètres de profondeur en immersion) car le bénéfice thérapeutique d'une compression à 50 mètres plutôt qu'à 30 mètres est dans la majorité des cas vraisemblablement modeste, tandis que les contraintes hyperbares pour le personnel sont clairement supérieures.

Des mises en pression à 30 mètres sont réalisées dans le cadre de la formation des personnels de la classe II, mention C.

Formation

- ***Formation du personnel civil***

Pour mener une activité d'hyperbariste médical, le personnel médical et paramédical doit être titulaire du CAH, Mention C, classe I ou II. Les personnels civils sont formés par des organismes agréés définis par arrêté, tel l'INPP.

La formation des médecins passe par l'obtention complémentaire du Diplôme Inter-Universitaire de Médecine Subaquatique et Hyperbare.

- ***Formation du personnel militaire***

Le personnel militaire est formé directement à l'école du VDG qui dispose d'une certification du Ministère du travail pour former les soignants (militaires uniquement) de la mention C, classe II.

La formation des infirmiers sécurité de la plongée, mention hyperbare (ISP-H) dure 5 semaines. Ces travailleurs appartiennent à la classe II. Ils reçoivent un enseignement théorique sur la physiologie de la plongée et un enseignement pratique à l'hôpital ainsi qu'à l'école du VDG quant à la manipulation d'un caisson hyperbare. Cette formation est sanctionnée par un examen. La formation au VDG est beaucoup plus lourde que celle enseignée à l'INPP qui dure seulement 15 jours. En effet, les profils d'activités des infirmiers seront divers à la sortie. Certains exerceront à l'hôpital sous la coupe d'un médecin tandis que d'autres évolueront seuls sur un bateau (cet isolement est à prendre en compte car sur le plan médical, ils seront seuls à gérer l'accident dans le caisson).

Le minimum requis pour accéder à la formation de médecin hyperbariste (classe II) est de détenir le certificat de médecine appliquée à la plongée sous-marine (CMAPSM). Ces médecins sont déjà plongeurs militaires de classe II (sortent d'une école – plongent à l'air à 35-40 mètres). Leur formation est à la fois théorique, sur la physiologie de la plongée (15 jours) et pratique (stage de 3 semaines au centre hyperbare). Elle est sanctionnée par un examen.

A la fois infirmiers du SSA et plongeurs de bord, les futurs infirmiers plongeurs hyperbaristes (IPH, classe II) reçoivent une formation de plongée (comme le médecin plongeur de bord) et une formation spécifique complémentaire sur un caisson (environ 1 mois et demi). Ils ont une mention « manipulateur caisson » que n'ont pas les ISP-H. Dans la marine, cette mention est obligatoire pour pouvoir manipuler un caisson. A terme, ces travailleurs deviennent experts des caissons *via* une formation continue améliorée. Leur plus-value est essentiellement technique.

La culture dans les armées, veut que les niveaux du personnel paramédical et médical soient corrélés à un niveau d'activités subaquatiques. Un infirmier qui veut obtenir le plus haut degré de formation sera IPH et peut faire dans certaines conditions le cours de plongeur démineur ou de nageur de combat. C'est la même chose pour les médecins spécialisés dans le domaine plongée.

Périodicité

Une journée de formation continue par an est organisée pour les médecins et les infirmiers et une réunion par mois dans le service de médecine hyperbare pour discuter et échanger les retours d'expériences sur les patients, les dossiers.

Une activité minimum est requise pour la justification des qualifications du personnel, infirmier notamment.

Modalités de remise à niveau des personnels sur l'utilisation des matériels

Un tableau d'entrainement est mis en place pour les infirmiers. Dès qu'une opération de plongée nécessite la présence d'un caisson, les infirmiers sont appelés à mettre au paré à manœuvrer le caisson, assurant une manipulation régulière du matériel. L'entrainement du 1er niveau infirmier classe II, mention C (ISP-H) ne concerne pas la manipulation du caisson (séjour en hyperbarie).

2.6.3.2 Interventions en chambre hyperbare (D'après les auditions du SSA, 2013)

Nature des gaz utilisés

- **Air comprimé**

Dans la chambre hyperbare à usage thérapeutique, les patients et les personnels sont exposés à de l'air comprimé (jusqu'à 4 ATA). Une norme définit ce mélange respiratoire. C'est de l'air refabriqué à partir des gaz constituants de l'air. Il a un degré d'hygrométrie très faible et ne contient en théorie pas d'impuretés.

- **Oxygène**

A l'intérieur du caisson, les patients font des paliers à l'Oxygène (entre 2,2 et 2,8 bars).

Parmi les personnels civils, il arrive que les soignants respirent de l'oxygène lors des paliers et à la pression atmosphérique pour minorer le GPS (groupe de plongées successives).

Au sein du SSA, les infirmiers ne font pas de décompression à l'oxygène. Cette procédure, validée par l'armée, permet aux infirmiers d'avoir une liberté d'action plus importante dans le caisson. Ils font toutes leurs opérations à l'air.

- **Nitrox et Héliox**

L'utilisation de ces mélanges respiratoires est possible jusqu'à 6 ATA, mais elle reste marginale. Les Héliox ou les Nitrox peuvent être utilisés dans le traitement des accidents de décompression neurologiques sur des tables à 4 ATA (profondeur équivalente de 30 mètres en immersion) ou 6 ATA (profondeur équivalente de 50 mètres en immersion). Le pourcentage d'oxygène dans le mélange ventilé doit être le plus élevé possible, tout en évitant d'atteindre une PpO_2 supérieure à 2,8 bars.

Avantages de l'utilisation des mélanges respiratoires par rapport à l'air pour les travailleurs de la mention C

L'avantage de faire des paliers de décompression à l'oxygène par rapport à la décompression à l'air est qu'ils permettent de minorer le risque d'accident de désaturation et (éventuellement) de minimiser la durée de la décompression.

L'utilisation de mélanges Nitrox ou Héliox en chambre hyperbare à la place de l'air présente l'intérêt de minorer la saturation et de préserver de la fatigue les personnels.

Limites de l'utilisation des mélanges respiratoires par rapport à l'air pour les travailleurs de la mention C

La limite de l'hyperbarie médicale à 6 ATA à l'air comprimé expose patients et soignants aux risques de narcose à l'azote et d'accident de désaturation.

Il est nécessaire de faire attention à la prise d'oxygène pour une pression supérieure à 2,2 ATA (profondeur de 12 mètres en immersion) qui expose les accompagnants à un risque convulsif hyperoxique.

L'utilisation d'oxygène est également limitée par la pression maximale respirée et la durée de respiration tolérées avant apparition des effets toxiques pulmonaires de l'oxygène.

D'un point de vue pratique, l'usage de mélanges Nitrox et Héliox est contraignant car cela oblige le personnel à porter un masque et risque de l'entraver dans ses activités médicales au sein du caisson.

L'utilisation de mélanges Trimix ne présente aucun intérêt dans l'hyperbarie médicale.

Type de tables de décompression/ Ordinateurs utilisés

Les personnels civils mettent en œuvre les procédures d'intervention en air comprimé sans immersion, décrites dans les tables MT 92 « Air » ou « Air-Oxy », spécifiques de la Mention C. Dans le cas d'expositions supérieures à 1,5 bar, les tables MT 92 de plongée (Air-Oxy 6 mètres) sont utilisées.

En revanche l'ensemble du personnel militaire (plongeurs et hyperbaristes) utilise les tables MN90, par souci d'unicité de formation.

Les patients sont soumis aux procédures de décompression des tables B18, Cx18 (*tables à l'oxygène pur - profondeur équivalente de 18 mètres en immersion)* ou Cx30 (*tables profondes - gaz inertes, profondeur équivalente de 30 mètres en immersion)* ; ces tables peuvent servir au personnel en cas d'accident.

Les ordinateurs de plongée ne sont pas utilisés pour gérer les séjours en pression, pour 2 raisons principales : en premier lieu, c'est l'opérateur à l'extérieur qui dirige la mise sous pression ; l'ordinateur ne peut pas entrainer une modification des paramètres de l'intervention. Il est toutefois possible d'en utiliser un pour surveiller de l'intérieur les paramètres du séjour en pression. En second lieu, chacun ne peut pas choisir sa procédure de décompression. Ceci est du domaine des procédures qui sont validées pour le service par l'employeur en accord avec le chef d'opération hyperbare.

Mode de fabrication et modalités d'analyse des gaz :

Suivant les hôpitaux, l'approvisionnement en bouteilles d'air médical ou de gaz respiratoires se fait auprès de sociétés spécialisées, mais l'air médical peut également être fabriqué directement dans l'hôpital.

A l'hôpital Sainte-Anne, c'est la cellule biomédicale qui gère les contrôles réguliers sur les gaz. Le service de médecine hyperbare ne fait pas de contrôle complémentaire. Un tableau de maintenance affiche les visites des compresseurs effectuées par les mécaniciens

Au VDG, Le contrôle des gaz respiratoires est sous-traité via un contrat de maintenance qui concerne l'ensemble des installations de gaz de l'hôpital. Ce contrôle est effectué 2 fois par an.

Traçabilité

La traçabilité des interventions est assurée par la tenue de relevés de chaque intervention avec un descriptif des gaz et mélanges respiratoires utilisés par les patients et par le personnel, qui sont contrôlés en continu durant chaque intervention. Dans les chambres hyperbares complètement automatisées, il est possible de disposer d'un enregistrement automatique des paramètres de l'intervention.

Procédures d'intervention et procédures de secours

Lors d'une intervention en chambre hyperbare à usage thérapeutique (pour une séance d'oxygénothérapie hyperbare par exemple), l'équipe est composée d'un manipulateur (de préférence apte à l'intervention hyperbare pour d'éventuelles actions techniques à l'intérieur de caisson en cours de traitement), d'un infirmier (obligatoirement apte à l'intervention hyperbare) et d'un médecin (obligatoirement apte à l'intervention hyperbare)

Si d'un point de vue légal, d'après le décret de 2011, il faut seulement 2 personnels (un opérateur et un accompagnant pour intervenir à l'intérieur), du point de vue normatif et d'après le code européen de bonne conduite, 3 personnels sont requis : un surveillant à l'extérieur, un infirmier accompagnant (apte à l'hyperbarie) et un chef des opérations hyperbares qui est en général le médecin prescripteur. Le code européen a par ailleurs été repris par la sécurité sociale pour pouvoir facturer un acte.

Lors d'une intervention sur un caisson de recompression mobile, l'équipe d'intervention comprend un directeur de plongée qui assure la fonction de COH (responsable de la mise en œuvre du traitement, il est apte à manipuler le caisson, mais ce n'est pas son rôle), un manipulateur, si possible un médecin (responsable du traitement, donne les directives thérapeutiques), un infirmier (administre le traitement à l'intérieur du caisson) et un secrétaire (chargé de tout noter). En l'absence du médecin, le directeur de plongée est responsable du traitement.

Maintenance et entretien du matériel

Modalités de contrôle

Les opérations de maintenance du caisson et du matériel à l'intérieur sont réalisées par des prestataires extérieurs à l'hôpital.

Contrôle annuel des équipements individuels

Les détendeurs utilisés dans les enceintes hyperbares afin de délivrer les mélanges suroxygénés aux patients doivent bénéficier d'une révision périodique. Toutefois la prise de risque devant un détendeur qui ne fonctionne pas n'est pas la même que pour les interventions en immersion puisqu'ici on se trouve au sec et à l'air.

Prophylaxie

La désinfection du caisson est faite par contact via un appareil spécifique (utilisé pour la désinfection des blocs opératoires). La désinfection sera faite une fois par mois voire plus suivant les infections particulières que peuvent présenter les patients traités dans le caisson.

Tout le circuit utilisable par le patient est jetable et individuel (masques, tuyaux, cagoules…) ou soumis aux normes hospitalières d'hygiène et de salubrité.

Tout service hyperbare est tenu d'établir une procédure de nettoyage de tous ses équipements. Cette procédure doit être validée par l'infirmière hygiéniste (s'il y en a) et le comité de lutte contre les infections nosocomiales (CLIN). Les procédures définissent les nettoyages quotidiens à effectuer, les nettoyages hebdomadaires et semestriels.

Le nettoyage des masques des patients est quotidien (réutilisables) par trempage dans une solution désinfectante. Les détendeurs utilisés dans une chambre hyperbare ne sont pas les mêmes que les détendeurs de plongée, ils ne sont pas en contact avec la bouche des patients. La tuyauterie de l'installation n'est pas nettoyée de l'intérieur.

Le nettoyage de l'intérieur et de l'extérieur de l'enceinte hyperbare est effectué par les infirmiers et les opérateurs de caisson thérapeutique qui le manipulent. Le nettoyage est effectué quotidiennement pour tout ce qui est en contact avec les patients ; de manière hebdomadaire, une partie du matériel (brancard, valise d'urgence) est extraite du caisson pour être nettoyé ; semestriellement, le plancher est démonté afin d'opérer un nettoyage plus profond.

Le nettoyage sera d'autant mieux fait que le matériel a été conçu pour. Entre un caisson de plateforme et un caisson thérapeutique, ce n'est pas du tout la même population qui occupe les caissons et les risques sont donc très différents. Certains patients ont des maladies contagieuses très graves qui ne doivent pas être transmises. Une organisation des séances doit donc également être envisagée pour limiter le risque nosocomial.

Ré-épreuve

Pour les caissons qui atteignent des pressions de 6 ATA (profondeur en immersion de 50 mètres) voire plus (Toulon, Lyon et Lille), la ré-épreuve est décennale. Pour les caissons qui ne dépassent pas 4 ATA (30 mètres de profondeur en immersion), il n'y a pas de ré-épreuve.

Cette ré-épreuve implique de remplir le caisson d'eau. Sous le poids de cette eau, la contrainte appliquée sur la dalle qui supporte le caisson est très forte, alors qu'elle n'a pas nécessairement été conçue pour cela. Cette ré-épreuve est par ailleurs très coûteuse.

2.6.3.3 Remarques de la profession

Méthodes d'intervention

❖ ***Chambre hyperbare à usage thérapeutique***

Le mieux pour le personnel est que la durée d'intervention soit la moins longue possible. Certains hôpitaux (le VDG par exemple) ont défini des bonnes pratiques propres au service hyperbare. Dans ces recommandations, il est précisé qu'un palier inférieur à 5 minutes pour le personnel accompagnant est la norme, sauf cas exceptionnels où les personnels sont obligés de rester en sous pression pendant toute la table, mais pour une durée ne dépassant pas 8 heures. Sauf situation exceptionnelle (et dérogatoire) ; les personnels ne devraient pas faire plus de 2 interventions sous pression par jour. Les accidents de désaturation chez les personnels des services hyperbares ne sont pas rares.

2.6.4 Mention D

2.6.4.1 Caractérisation de la population professionnelle

Métiers représentés et répartition des effectifs

Les travailleurs relevant de la mention D, sont les « tubistes ». Ces personnels participent à différents types de chantiers dans un environnement pressurisé, mais sans immersion. Ils peuvent être amenés à intervenir dans les têtes de tunnelier (la majorité des effectifs), les enceintes de confinement des réacteurs nucléaires ou encore les cabines d'avion.

Suivant leur classement, ils sont habilités à travailler en atmosphère sèche jusqu'à la pression relative de 1,2 bar (classe 0), 3 bars (classe I), 5 bars (classe II) et pour une pression relative supérieure à 5 bars (classe III).

Age des travailleurs

La limite d'âge pour postuler la première fois au certificat d'aptitude à l'hyperbarie de classe I et II pour la mention D était jusqu'à très récemment de 55 ans (D'après audition Jean-Claude Le Péchon, 2013). Il n'y a plus aujourd'hui de limite d'âge en vigueur.

Description de l'activité

Les personnes titulaires de cette mention sont principalement des tubistes qui travaillent dans les tunneliers. Leurs activités sont très variables et dépendent des conditions du chantier de construction de tunnel. Ce sont des ouvriers du chantier qui ont en plus, une certification pour travailler en conditions hyperbares et peuvent donc être affectés en cas de nécessité au travail sous pression (D'après audition Jean-Claude Le Péchon, 2013).

La demande de tubistes au cours de ce type de travaux est aléatoire en France et l'activité se limite souvent à des interventions ponctuelles de vérification et réparation du matériel de coupe ou d'abattage notamment. Cela a été le cas pour la construction du métro de Toulouse où une seule intervention hyperbare a été nécessaire pendant toute la durée des travaux de creusement des lignes. Seule la jonction au centre ville a nécessité un nombre significatif d'interventions hyperbares de courtes durées. Lors des travaux de construction du périphérique nord à Lyon en revanche, au total ont été nécessaires 10 000 interventions en 3 ans à 2,7 bars ce qui illustre bien la forte variabilité selon les chantiers (D'après audition Jean-Claude Le Péchon, 2013).

Contrairement à la France où ce type de chantiers se fait plus rare, l'activité de construction de tunnels dans le monde est en plein essor et concerne des projets de constructions d'égouts ou de tunnels de métro, d'autoroutes et de galeries techniques. Les activités de construction de tunnel en Chine et en Russie sont en pleine expansion ; Hong-Kong compte 6 tunneliers en activité et la Chine 30 tunneliers pour la seule ville de Shanghai. Des tunneliers vont être mobilisés pour la construction du grand Paris et les pressions d'intervention risquent d'y être élevées (D'après audition Jean-Claude Le Péchon, 2013).

De manière plus anecdotique, les travailleurs de la mention D font des visites de cabines d'avion à 0,6 bar pour la recherche de fuites et le contrôle systématique de l'étanchéité de la cabine avant toute livraison d'un appareil. Des appareils étant livrés tous les jours, certains personnels sont exposés quotidiennement (D'après audition Jean-Claude Le Péchon, 2013).

Ces hyperbaristes sont également amenés à intervenir en centrale nucléaire pour effectuer la visite décennale du « bâtiment réacteur », lors des arrêts de tranche. Une équipe est mobilisée pendant 3 à 4 jours et visite l'enceinte pressurisée en deux étapes. La première étape s'effectue à 1 bar. Elle est réalisée par du personnel EDF formé extemporanément à l'hyperbarie mention D classe 0 et permet de vérifier qu'il n'y a pas de fuite du bâtiment réacteur. La seconde étape, en cas de fuite, a lieu à 4,2 bars ; il peut être nécessaire d'entrer dans le bâtiment réacteur requérant en général l'intervention d'une équipe de scaphandrier mention A. Compte tenu du nombre de

centrales EDF, on estime à 1 ou 2 le nombre d'arrêts de tranche par an et les tests hyperbares durent en général moins d'une semaine (D'après audition Jean-Claude Le Péchon, 2013).

Formation du personnel

Suivant la classe, la durée de formation au CAH mention D « tunnelier tubiste » est variable : 2 jours pour la classe 0 (tubistes pouvant être comprimés jusqu'à 1,2 bars de pression relative), 4 jours pour la classe I (tubistes pouvant être comprimés jusqu'à 3 bars de pression relative), 1 semaine pour la classe II (tubistes pouvant être comprimés jusqu'à 5 bars de pression relative) et 2 semaines pour la classe III (tubistes pouvant être comprimés au-delà de 5 bars de pression relative). Elle comprend des cours théoriques et des cours pratiques avec intervention en chambre hyperbare. Aucun pré requis n'est demandé pour accéder à ces formations.

Des formations complémentaires (non sanctionnées par des certificats) sont nécessaires pour occuper les fonctions de COH et de chef de sas. Le COH est un encadrant responsable amené à prendre des décisions et à gérer des situations, il est de niveau technicien supérieur ou ingénieur, chef de sas et tubiste. Pour suivre une formation de chef de sas, les pré requis sont d'être techniciens avec une formation complémentaire et d'avoir suivi la formation de tubiste mention D classe I (même sans aptitude médicale et donc éventuellement sans mise en pression).

A chaque nouveau chantier, les personnels sont recyclés, reformés sur l'entretien, la maintenance, la réparation des matériels.

2.6.4.2 Interventions en tunnelier (D'après audition Jean-Claude Le Péchon, 2013)

Nature des gaz utilisés

En France, les travaux de tunneliers sont réalisés uniquement à l'air comprimé avec décompressions à l'oxygène dans la majorité des cas, lorsque la pression dépasse 1,8 bar.

A l'étranger, quand la pression dépasse parfois 4 bars, les travailleurs interviennent en respirant des mélanges gazeux autres que l'air, contenant notamment de l'hélium. En France, ces situations de dépassement de 4 bars ne se présentent pas car il n'y a pas actuellement de travaux effectués à cette pression. Le cas pourrait éventuellement se présenter dans le cadre des travaux de construction du grand Paris (la pression sera peut-être même supérieure à 5 bars). Dans ce cadre, des procédures de mise en pression à saturation pourraient être mises en œuvre.

Procédures d'intervention et procédures de secours

Lors d'une intervention en tunnelier, l'équipe minimale sur le site est ajustée au cas par cas (selon le temps, la pression, le nombre d'intervenants…). Elle comprend toujours 2 travailleurs sous pression puisqu'il faut travailler systématiquement en binôme à l'intérieur de la chambre de travail. Les personnels disposent d'un sas à pression atmosphérique pour entrer et sortir (voire plusieurs sas pour l'entrée, la sortie et le secours). A l'extérieur de la chambre de travail, un secours est présent, un chef de sas ainsi qu'un COH. Il faut 5 personnes minimum assurant ces différentes fonctions. Lorsqu'il y a 2 sas, si le poste de travail du chef de sas est séparé (si les 2 sas ne sont pas contrôlés du même endroit), il faut 2 personnes pour assurer cette fonction.

L'incendie étant un des dangers majeurs sur ce type de chantier en galerie, des mesures spécifiques sont prises pour réduire au maximum le risque d'inflammation dans la zone pressurisée ainsi que dans le tunnel lui-même.

Par ailleurs, l'atmosphère de la chambre de travail peut être contaminée par différents polluants de sources variées (air comprimé vicié, produits ou techniques mis en œuvre, polluants provenant du terrain). L'air de la chambre de travail devant rester respirable, il est important d'identifier ces sources de pollution éventuelle et de surveiller la qualité de l'air.

2.6.5 Synthèse

Le Tableau 3 ci-dessous reprend les informations principales délivrées dans ce chapitre. Il synthétise pour chaque mention, suivant les domaines d'activités des travailleurs, les données de caractérisation de la population professionnelle concernée (effectif, âge) ainsi que les pratiques mises en œuvre (zone d'intervention ; technique d'intervention et gaz respiratoires utilisés ; fréquence moyenne d'intervention).

Tableau 3 : Tableau de synthèse descriptif des populations et leurs pratiques suivant les domaines d'activités en milieu hyperbare

		Activité professionnelle	Effectif (France)	Age moyen des travailleurs	Zone d'intervention (pression / profondeur)	Méthode d'intervention (technique + gaz respiratoires)	Fréquence moyenne d'intervention	Remarques
INTERVENTIONS EN MILIEU IMMERGÉ								
Mention A	**travaux subaquatiques** (activités de scaphandrier) : travaux maritimes, pétroliers, industriels, opérations de génie civil (BTP)	Scaphandriers (1) Classés (2) En activité BTP Offshore	 (1) 1500 (2) 500 450 50	35 ans [20-65]	De 0 à 200 mètres BTP : 0 à 12 mètres (80% interventions) Offshore : 200 mètres	De 0 à 50 mètres - **Narguilé** : *Air (+++) ; Nitrox* Paliers de déco O_2 > 50 mètres -**Plongée bulle ou systèmes** : *Héliox*	5 jours/sem 225 jours/an 200 plongées/an	Recycleur à envisager - lors des travaux nécessitant des plongées « sous-plafond » (galeries, sous la glace…) - travaux à grande profondeur (permet de regagner la tourelle ou la bulle de plongée)
Mention B	**différents types d'interventions subaquatiques** activités physiques ou sportives, archéologie sous-marine et subaquatique, arts, spectacles et médias, cultures marines et aquaculture, défense, pêche et récoltes subaquatiques, secours et sécurité	encadrants professionnels de plongée sportive	2000	30 ans [25-35]	De 0 à 80 mètres (avec un système autonome de plongée)	**- SCUBA :** *Air (+++) ; Nitrox* Paliers de déco O_2 **-Recycleurs :** *Nitrox ; O_2 pur ; Nitrhéliox ; Héliox* - **Apnée**	Travail saisonnier (2 à 7 mois) 4 plongées par jour en haute saison	
		plongeurs archéologues	300	45 ans [30-60]	De 0 à 50 mètres	**- SCUBA** *Air* (+++) ; *Nitrox* Paliers de déco O_2 - **Narguilé** (ponctuellement)	10 à 50 interventions par an	Recycleur à envisager pour un effectif illimité de plongeurs, pour faire une expertise photographique et archéologique avant le démarrage d'un chantier
		plongeurs militaires	2000	30 ans [18-55]	De 0 à 80 mètres Plongées « carrées » Recycleur utilisé en zone portuaire, profondeur moyenne de 15 mètres	- **SCUBA :** *Air ; Nitrox* ; *Nitrhéliox* - **Recycleur** : *Air* (0 à 35 mètres) ; *Nitrox* ; *Nitrhéliox* (jusqu'à 80 mètres) - **Narguilé** (ponctuellement) -**Dispositifs immergés** : *Héliox*	50 plongées maximum par mois ; Moyenne de 80 plongées par an	

		pompiers plongeurs	3000	40 ans [23-58]	De 0 à 60 mètres Plongées « carrées »	- **SCUBA** (0 à 50 mètres) : *Air* (+++) ; *Nitrox etTrimix* (en formation) Palier O_2 ou Surox (entre 50 et 60 mètres) -**Narguilé** (anecdotique)	30 plongées par an	Recycleurs et mélanges envisagés pour des équipes restreintes
		plongeurs scientifiques	250	45 ans [20-70]	De 0 à 50 mètres Profondeur moyenne de 20 mètres	- **SCUBA** (0 à 50 mètres) : *Air* (+++) ; *Nitrox etTrimix* (usage confidentiel) - Narguilé (anecdotique) Paliers O_2 (entre 40 et 50 mètres)	De 20 à 150 plongées par an (suivant les postes)	Autorisations spéciales pour plonger jusqu'à 100 mètres en recycleurs délivrées par les autorités dans le cadre de projets d'exploration L'apnée est une pratique d'intérêt pour les scientifiques
INTERVENTIONS SANS IMMERSION								
Mention C	**mise en œuvre des installations hyperbares médicales** (médecins, infirmiers, aides-soignants, techniciens, *etc.*)	hyperbaristes médicaux	400	Variable selon la fonction	De 0 à 50 mètres En pratique, les interventions dépassent rarement 30 mètres (4 ATA)	*Air* (+++) Paliers O_2 *Nitrox, Héliox* (anecdotique)	2 mises en pression par jour maximum	
Mention D	**travaux sans immersion** tubistes dans les tunneliers, soudeurs hyperbares, agents des centrales nucléaires, personnels de l'industrie aéronautique, *etc.*	tubistes	-	-	De 0 à 50 mètres	*Air* (+++) Paliers O_2 (dès que la P.Abs > 1,8 bar)		

2.7 Sécurité et réglementation

2.7.1 Réglementation française et procédures spécifiques

Le décret n°2011-45 du 11 janvier 2011 impose aux employeurs des règles destinées à assurer la sécurité et protéger les salariés exposés aux conditions hyperbares. Les dispositions définies dans le décret s'appliquent dès lors que des travailleurs sont exposés à une pression absolue supérieure à 1,1 bar dans l'exercice de tout ou partie des activités suivantes réalisées avec ou sans immersion :

- Travaux hyperbares exécutés par des entreprises soumises à certification : liste de l'article R. 4461-48 du code du travail, travaux industriels, de génie civil ou maritimes…
- Interventions en milieu hyperbare réalisées dans le cadre d'activités physiques ou sportives, culturelles, scientifiques, techniques, maritimes, aquacoles, médicales, de sécurité, de secours et de défense…

Procédures d'interventions, précautions d'organisation, compétence des personnels, organisation des secours doivent faire suite à une évaluation des risques et être adaptées à chaque situation pour réduire les risques au maximum.

2.7.1.1 Travail en milieu hyperbare : mesures techniques de prévention

Pour chaque Mention, des procédures d'intervention, procédures de secours et manuel de sécurité hyperbare sont précisées dans les arrêtés d'application. Ces arrêtés définissent notamment :

- Les gaz ou mélanges gazeux respiratoires autorisés ;
- Les durées d'intervention ou d'exécution des travaux, tenant compte de l'exposition du travailleur ;
- Les caractéristiques et conditions d'utilisation des appareils respiratoires ;
- La composition des équipes lorsque il est nécessaire que celles-ci soient renforcées pour tenir compte des méthodes et conditions d'intervention ou d'exécution de travaux particulières, en milieu hyperbare ;
- Les prescriptions d'utilisation applicables aux enceintes pressurisées habitées, notamment aux caissons de recompression, aux systèmes de plongées à saturation, aux caissons hyperbares thérapeutiques, aux tourelles de plongées, aux bulles de plongées et aux caissons hyperbares des tunneliers ;
- Les procédures et moyens de compression et de décompression ;
- Les méthodes d'intervention et d'exécution de travaux ainsi que les procédures de secours et la conduite à tenir devant les accidents liés à l'exposition au risque hyperbare.

<u>Interventions et exécution de travaux en conditions hyperbares</u>

Les durées d'intervention ou d'exécution des travaux doivent tenir compte de l'exposition de chaque travailleur. Seuls sont aptes à intervenir en milieu hyperbare les travailleurs qui ont bénéficié d'une formation et titulaires d'un CAH.

Lors d'une intervention, une équipe est constituée d'au moins 2 personnes.

- un opérateur titulaire du certificat d'aptitude à l'hyperbarie, habilité à intervenir en conditions hyperbares ;
- un surveillant qui veille à la sécurité des travailleurs, capable de donner les premiers secours en cas d'urgence.

Des dispositions spécifiques (procédures d'intervention et procédures de secours et la conduite à tenir devant les accidents liés à l'exposition au risque hyperbare), propres à chaque type d'activités professionnelles seront précisées dans les arrêtés d'application du décret correspondants, notamment dans les cas où il est nécessaire que celles-ci soient renforcées pour tenir compte des méthodes et conditions d'intervention ou d'exécution de travaux particulières.

Les caractéristiques et conditions d'utilisation des équipements

D'après la réglementation, le matériel individuel de plongée doit être considéré comme un équipement de protection individuelle. Ce matériel est donc réglementé et doit notamment répondre aux exigences définies par la réglementation nationale (Décret n° 93-40 du 11 janvier 1993) et les normes européennes. Ces matériels sont soumis à des obligations de contrôles réguliers, particulièrement les détendeurs pour lesquels toutes les opérations de maintenance doivent être tracées. Les modalités de ces contrôles ainsi que leur périodicité seront définies par arrêté, suivant le secteur professionnel concerné.

Concernant le matériel collectif (compresseurs, sas de tunneliers, chambres hyperbares à usage thérapeutique, caissons de recompression…) un arrêté conjoint du Ministre chargé du travail et celui de l'Agriculture devrait définir les spécifications techniques et opérationnelles auxquelles devront satisfaire ces équipements. Par ailleurs, pour certains de ces équipements, des textes réglementaires ou des normes européennes existent déjà.

Gaz et mélanges gazeux

Dans le cadre des interventions et travaux réalisés en milieu hyperbare (hors apnée), les gaz ou mélanges gazeux respiratoires autorisés sont l'air, un autre mélange gazeux ou l'oxygène pur.

Le choix des gaz respiratoires doit être adapté suivant le type d'interventions réalisées en conditions hyperbares par ses salariés. Le choix et la qualité du gaz respiratoire mis à la disposition des travailleurs sont de la responsabilité de l'employeur.

Le décret autorise la respiration d'air comprimé jusqu'à une pression absolue de 7 bars (60 mètres de profondeur) et préconise l'utilisation de mélanges respiratoires spécifiques au-delà de 7 bars de pression absolue.

L'air ou les mélanges respirés au cours des interventions et travaux doivent présenter les caractéristiques suivantes :

Tableau 4 : Limites d'exposition par type de polluant (Décret n°2011-45 du 11 janvier 2011)

Type de polluant	Limites d'exposition
gaz carbonique (CO_2)	pression partielle inférieure à 10 hectopascals soit 10 millibars
monoxyde de carbone (CO)	pression partielle inférieure à 5 pascals soit 0,05 millibar
vapeur d'eau	pour les expositions d'une durée supérieure à 24 heures degré hygrométrique compris entre 60% et 80%
vapeurs d'huile	pression partielle (exprimée en équivalent méthane) inférieure à 0,5 hectopascal soit 0,5 millibar et une concentration inférieure à 0,5 mg/m^3
poussières totales et alvéolaires	respect des valeurs limites d'exposition professionnelle (VLEP) fixées par le code du travail (articles R. 4222-10, R. 4412-149 et R. 4412-150) transposées en pressions partielles pour être applicables en situation hyperbare
agents chimiques	

La masse volumique d'un mélange respiratoire ne doit pas excéder 9 g/litre à la pression d'utilisation.

Tableau 5 : Limites d'exposition par type de gaz respiratoire (Décret n°2011-45 du 11 janvier 2011)

Gaz respiratoires	**Limites d'exposition**
Azote (N_2)	PpN_2 < 5 600 hectopascals soit 5,6 bars
Oxygène (O_2)	*Limite inférieure* PpO_2 >160 hectopascals soit 160 millibars (risque hypoxique)
	Limites supérieures ➢ Au sec, dans une enceinte hyperbare de travail - PpO_2 < 25% de la pression absolue ➢ Au cours d'une intervention (hors compression et décompression) - PpO_2 < 1 600 hPa (1,6 bar) pour une durée continue d'exposition < 3 h - PpO_2 < 1 400 hPa (1,4 bar) pour une durée continue d'exposition < 4 h - PpO_2 < 1 200 hPa (1,2 bar) pour une durée continue d'exposition < 5 h - PpO_2 < 1 000 hPa (1 bar) pour une durée continue d'exposition < 6 h - PpO_2 < 900 hPa (0,9 bar) pour une durée continue d'exposition < 8 h ➢ En phase de décompression en immersion : PpO_2 < 1 600 hPa (1,6 bar) au sec : - PpO_2 < 2 200 hPa (2,2) bars pour une décompression < 24 h - PpO_2 < 800 hPa (0,8 bar) pour une décompression > 24 h ➢ En phase de compression ou de repos à saturation - 300 hPa (0,3 bar) < PpO_2 < 450 hPa (0,45 bar) ➢ Lors d'une recompression d'urgence après un accident de décompression - PpO_2 < 2 800 hectopascals (2,8 bars) sauf prescription médicale différente.

2.7.1.2 Travail en milieu hyperbare : mesures organisationnelles de prévention

Document unique d'évaluation des risques rédigé par l'employeur

Dans le cadre de l'évaluation des risques, l'employeur est tenu de consigner dans le document unique d'évaluation des risques en particulier les éléments suivants :

- Le niveau, le type et la durée d'exposition au risque hyperbare des travailleurs ;
- L'incidence sur la santé et la sécurité des travailleurs exposés à ce risque ;
- L'incidence sur la santé et la sécurité des autres risques liés aux interventions et leurs interactions avec le risque hyperbare ;
- Les variables d'environnement telles que les courants, la météorologie, la température, la turbidité et tout autre élément ayant une incidence sur les conditions d'intervention;

- Les caractéristiques techniques des équipements de travail ;
- Les recommandations spécifiques du médecin du travail concernant la surveillance de la santé des travailleurs.

Création d'un conseiller à la prévention hyperbare

L'employeur est désormais tenu de désigner une personne chargée d'assurer la fonction de CPH.

Ce conseiller participe notamment à l'évaluation des risques, à la mise en œuvre de toutes les mesures propres à assurer la santé et la sécurité des travailleurs intervenant en milieu hyperbare, à l'amélioration continue de la prévention des risques à partir de l'analyse des situations de travail.

Pour être nommé à cette fonction, il est nécessaire d'être titulaire d'un certificat de conseiller à la prévention hyperbare correspondant à la mention et la classe des travailleurs intervenant en conditions hyperbares au sein de l'entreprise pour lesquels le CPH sera amené à proposer des mesures de prévention. Dans les entreprises de moins de dix salariés, l'employeur peut occuper cette fonction à la condition d'être titulaire du certificat de CPH dans les mêmes conditions que celles précisées ci-dessus.

L'organisation des formations en vue de l'obtention d'un certificat de CPH ainsi que la durée de validité ou les conditions de renouvellement seront précisées par arrêtés suivant l'ampleur et la nature des risques liés à chaque type d'intervention ou de travaux en milieu hyperbare.

Etablissement d'un manuel de sécurité hyperbare

Ce manuel, régulièrement mis à jour, à disposition des travailleurs et du comité d'hygiène, de sécurité et des conditions de travail (CHSCT), est établi avec le conseiller à la prévention hyperbare. Soumis à l'avis du médecin du travail, du CHSCT ou à défaut des délégués du personnel, il tient compte des résultats de l'évaluation des risques et précise : les fonctions des travailleurs intervenant sur un chantier hyperbare ; les équipements requis et les modalités de leur contrôle ; les règles de sécurité à observer au cours d'une opération ; les éléments environnementaux que les travailleurs doivent évaluer lors du déroulement des opérations (configuration des lieux, température, pressions relative, interférences avec d'autres opérations…) ; les méthodes d'intervention et d'exécution des travaux ; les procédures d'alerte et d'urgence ; les moyens de secours extérieurs à mobiliser ; les moyens de recompression disponibles et leur localisation.

Etablissement d'une notice de poste

Une fiche de poste est désormais remise à chaque travailleur. L'objet de cette fiche est d'informer sur les risques auxquels son travail l'expose ainsi que les précautions prises pour les éviter ou les réduire. Elle rappelle notamment les règles d'hygiène et de sécurité applicables, les consignes relatives aux mesures de protection collective ou des équipements de protection individuelle.

Etablissement d'une fiche de sécurité

L'employeur est tenu d'établir une fiche de sécurité pour chaque intervention et dont le modèle est intégré au manuel de sécurité hyperbare.

Sur cette fiche doivent être consignés la date et le lieu des travaux hyperbares, l'identité des travailleurs concernés, leur fonction, les durées d'exposition, les pressions relatives et les mélanges utilisés.

Prévention de la pénibilité

La pénibilité au travail se caractérise par une exposition à un ou plusieurs facteurs de risques professionnels susceptibles de laisser des traces durables, identifiables et irréversibles sur la santé (Article L. 4121-3-1 du Code du travail). Ces facteurs de pénibilité sont définis dans le Code du travail (Article D. 4121-5). En tant qu'environnement physique agressif, les activités en milieu hyperbare sont par ailleurs identifiées comme un facteur de pénibilité.

Afin d'assurer une traçabilité des expositions des personnels aux facteurs de pénibilité identifiés, l'employeur est tenu d'établir pour chaque salarié exposé une fiche spécifique d'exposition.

Ainsi, pour chaque travailleur intervenant en milieu hyperbare, l'employeur doit donc désormais renseigner une fiche spécifique d'exposition aux travaux en milieu hyperbare. Cette fiche décrit les conditions de pénibilité, la période au cours de laquelle cette exposition est survenue ainsi que les mesures de prévention mises en œuvre. Elle est ensuite communiquée au Service de Santé au Travail qui la transmet au médecin du travail. Elle complète le dossier médical du salarié; une copie de cette fiche est remise au salarié à son départ de l'établissement.

2.7.1.1 Suivi médical des travailleurs exposés

Surveillance médicale renforcée (SMR)

Les salariés exposés au risque hyperbare sont identifiés via l'article RR4624-18 du code du travail, modifié par décret n°2012-135 du 30 janvier 2012 – art. 1 comme des travailleurs pour lesquels le médecin du travail exerce une surveillance médicale renforcée (SMR) (Risque hyperbare : Décrets du 28 mars 1990 et 30 avril 1996). Toute personne travaillant en milieu hyperbare justifie d'une SMR quelles que soient la durée, l'intensité et la fréquence d'exposition, avec des examens cliniques et paracliniques prévus par la règlementation. Un barème d'exposition n'est dans cette situation, pas justifié.

La périodicité minimale des visites médicales en matière de surveillance médicale renforcée a été récemment modifiée, elle est passée d'un an à 24 mois (Décret n° 2012-135 du 31 janvier 2012). Ainsi, cette surveillance comprendra au moins un ou des examens de nature médicale selon une périodicité n'excédant pas 24 mois. Quoi qu'il en soit, le médecin du travail reste juge des modalités de la surveillance médicale renforcée, en tenant compte des recommandations de bonnes pratiques existantes et sous réserve du respect de la périodicité des examens obligatoires (au moins tous les 24 mois).

La surveillance médicale renforcée est fondée sur un examen clinique général et sur des examens complémentaires spécialisés. Elle est pratiquée avant l'affectation en milieu hyperbare puis tous les six mois ou tous les ans selon que les travailleurs concernés sont âgés respectivement de plus ou de moins de quarante ans et lors de tout incident ou accident hyperbare.

Aptitude médicale au poste de travail avec intervention en milieu hyperbare

Les salariés français sont soumis à des visites régulières d'aptitude qui conditionnent leur accès puis leur maintien à un poste de travail donné. Cet avis d'aptitude médicale au poste de travail est établi par le médecin du travail après chacune des visites médicales des différents moments de la vie professionnelle du salarié. Le médecin doit vérifier la compatibilité de la santé du salarié avec l'activité exercée et si nécessaire, proposer des aménagements du poste. A l'issue de cette visite médicale, une fiche d'aptitude en double exemplaire est remise au salarié, l'un des exemplaires est destiné à l'employeur.

Tout travailleur intervenant en milieu hyperbare doit posséder une fiche d'aptitude médicale au poste de travail avec intervention en milieu hyperbare, contrôlée par un Médecin du Travail (Travailleurs relevant du régime général) ou un médecin des Gens de Mer (travailleurs relevant de l'ENIM – le régime social des marins). Pour pouvoir être affecté à des interventions en hyperbarie, la fiche d'aptitude médicale, prenant en compte l'ensemble des risques encourus au poste de

travail, doit attester que le travailleur ne présente pas de contre-indication médicale à la pratique d'une activité professionnelle en milieu hyperbare.

L'arrêté du 28 mars 1991 définit les recommandations aux médecins chargés de la surveillance médicale des personnels intervenant en milieu hyperbare et les conditions d'aptitude communes à toutes les mentions.

Jusqu'en 2012, la liste des examens prescrits pour les travailleurs en conditions hyperbares était la suivante : examen clinique général avec interrogatoire sur les antécédents personnels et des accidents de plongée, épreuve fonctionnelle respiratoire (EFR), audiométrie avec impédencemétrie, électrocardiogramme (ECG) de repos, ECG d'effort sous-maximal avec mesure de la consommation maximale d'oxygène (VO_2 max) par mesure indirecte, radiographie pulmonaire, radiographie des hanches épaules de face et genoux de profils, électro-encéphalogramme (EEG), test en caisson à 1,2 bar. Les examens prescrits étaient calibrés par les techniques médicales (d'imageries notamment) utilisées il y a 20 ans et qui ont depuis évolué.

Depuis 2012, le médecin du travail est libre de définir les contenus des visites régulières. Ce contenu est adapté en relation avec l'employeur et la fiche de poste du travailleur. Il devra tenir compte des règles de bonnes pratiques qui sont en cours d'élaboration par la société française de médecine du travail et de la société de médecine et de physiologie subaquatiques et hyperbares de langue française. Elles devraient être finalisées fin 2014.

A l'issue de cette visite, certains examens complémentaires spécifiques peuvent être demandés, notamment pour caractériser une inaptitude (définitive, temporaire). Ils seront réalisés par le médecin du travail ou par un ou des médecins extérieurs ou des centres d'expertises médicaux au risque hyperbare. Les examens prescrits en complément par le médecin du travail ne peuvent être invasifs et ils sont à la charge de l'entreprise.

En cas d'accidents grave, le certificat médical de non contre-indication à la pratique professionnelle de l'hyperbarie n'est plus valable. Le travailleur devra donc repasser une visite médicale sous la responsabilité de la médecine du travail ou auprès d'un expert si celle-ci le juge nécessaire (en l'absence de compétences en médecine subaquatique et hyperbare).

Accidents de travail, maladies professionnelles et réparation

Les impacts sanitaires induits par une exposition aigüe ou chronique au milieu hyperbare sont susceptibles de conduire à une inaptitude temporaire voire définitive des travailleurs.

Certaines pathologies causées par l'exposition professionnelle aux conditions hyperbares sont reconnues et prises en charge par la sécurité sociale : effets osseux et articulaires ainsi que des pathologies ORL. Elles sont recensées dans le tableau de maladies professionnelles n°29 du régime général : « Lésions provoquées par des travaux effectués dans des milieux où la pression est supérieure à la pression atmosphérique » (Code de la sécurité sociale, Annexe II : Tableaux des maladies professionnelles prévus à l'article R. 461-3) (Tableau 6).

Tableau 6 : Tableau des maladies professionnelles n° 29

29 RÉGIME GÉNÉRAL

Lésions provoquées par des travaux effectués dans des milieux où la pression est supérieure à la pression atmosphérique

Date de création : Décret du 9 février 1949 Dernière mise à jour : décret du 19 juin 1985

Désignation des maladies	Délai de prise en charge	Liste limitative des travaux susceptibles de provoquer ces maladies
Ostéonécrose avec ou sans atteinte articulaire intéressant l'épaule, la hanche et le genou, confirmée par l'aspect radiologique des lésions.	20 ans	Travaux effectués par les tubistes.
Syndrome vertigineux confirmé par épreuve labyrinthique.	3 mois	Travaux effectués par les scaphandriers.
Otite moyenne subaiguë ou chronique.	3 mois	Travaux effectués par les plongeurs munis ou non d'appareils respiratoires individuels.
Hypoacousie par lésion cochléaire irréversible, s'accompagnant ou non de troubles labyrinthiques et ne s'aggravant pas après arrêt d'exposition au risque. Le diagnostic sera confirmé par une audiométrie tonale et vocale effectuée de six mois à un an après la première constatation.	1 an	Interventions en milieu hyperbare.

2.7.2 Réglementation, procédures spécifiques et bonnes pratiques (guides, *etc*) à l'étranger

2.7.2.1 Méthode de la consultation

Une consultation internationale a été initiée au mois d'octobre 2013 par voie électronique. Cette consultation concernait l'Europe et l'Amérique du Nord (Etats-Unis et Canada). Les agences ou autorités nationales ont été directement sollicitées par l'Anses. Par ailleurs, l'Anses s'est rapprochée de l'agence européenne en charge de la sécurité et la santé au travail (EU OSHA) qui a servi de relais auprès de tous les points focaux des états membres dans le domaine de la santé au travail. Des relances et autres compléments d'informations ont été demandés jusqu'en décembre 2013. Le tableau suivant présente les institutions sollicitées.

Tableau 7 : Institutions sollicitées lors de la consultation sur la réglementation et les pratiques à l'international pour les activités réalisées en conditions hyperbares avec des mélanges gazeux autres que l'air

Pays	Organisme
Consultation pays/pays	
Allemagne	BAuA (Federal Institute for Occupational Safety and Health) IFA (Institut für Arbeitsschutz der Deutschen Gesetzlichen Unfallversicherung / Institute for Occupational Safety and Health of the German Social Accident Insurance) BG BAU - Berufsgenossenschaft der Bauwirtschaft (German Social Accident Insurance Institution for the building trade) (GTÜM) (Gesellschaft für Überdruckmedizin (société de médecine hyperbare))
Suisse	IST (Institut Universitaire Romand de Santé au Travail) SUVA (Caisse nationale suisse d'assurance en cas d'accidents)
Finlande	FIOH (Finnish Institute of Occupational Health)
Danemark	NRCWE (National Research Centre for the Working Environment) Danish Working Authority
Royaume-Uni	HSL (Health and safety laboratory) / HSE (Health and safety executive)
Norvège	STAMI – National institute for occupational health NSDM (Norsk senter for dykkemedisin– Norwegian Center for diving medicine)
Pays-Bas	Health Council of the Netherlands
	Academic Medical Center, University of Amsterdam, Coronel Institute of Occupational Health
Italie	INAIL (Italian National Insurance for Work Accidents and Occupational Diseases, Occupational medicine department)
Etats-Unis	NIOSH (National Institute for Occupational Safety and Health)
Québec/Canada	INSPQ (Institut national de santé publique du Québec) IRSST (Institut de recherche Robert-Sauvé en santé et en sécurité du travail)
Russie	Saint Petersburg Medical Academy of Postgraduate Studies (RAMS) (Russian Academy of Medical Science Institute of occupational health)
Consultation via l'agence européenne pour la sécurité et la santé au travail	
Europe	EU-OSHA (European Agency for Safety and Health at Work) Réponses issues de la consultation : **Allemagne, Royaume-Uni, Autriche et Hongrie**

Les correspondants ont été interrogés sur plusieurs thématiques articulées autour de quatre axes :

1. Réglementation de votre pays concernant le travail en conditions hyperbares :

- Avez-vous connaissance des textes qui réglementent l'encadrement de la pratique des activités professionnelles hyperbares?
- Avez-vous connaissance d'une réglementation dans votre pays encadrant l'utilisation des appareils à recyclage de gaz, les « recycleurs » ?
- Avez-vous connaissance d'une réglementation dans votre pays encadrant la pratique de l'apnée professionnelle (plongée scientifique, archéologie, pêche…) ?

2. Conditions d'utilisation des gaz ou mélanges gazeux respiratoires autres que l'air utilisés lors des activités professionnelles hyperbares et les équipements associés :

- Pouvez-vous nous fournir des informations sur les gaz/mélanges gazeux respiratoires autres que l'air utilisés, les équipements associés et les modalités de leur utilisation (nature des gaz/mélanges gazeux utilisés, types de matériels utilisés, temps et fréquence d'utilisation…). ?

Par ailleurs, les questions concernaient les caractéristiques des populations professionnelles concernées par le travail en conditions hyperbares, tous secteurs confondus (activités exercées, effectifs, classes d'âges, nombre d'interventions annuelles, nombre moyen d'interventions totales par travailleur, nombre moyen d'années de travail hyperbare par travailleur…) et le recueil de données sur les effets sanitaires (à court et long terme) sur l'organisme liés à l'usage des mélanges gazeux et matériels identifiés ainsi que des données sur leur fréquence de survenue (Type d'accidents/effets sanitaires, nombre/fréquence de survenue, cause, gravité/conséquences, secteurs professionnels concernés…).

2.7.2.2 Résultats de la consultation

Au total, 23 réponses ont été reçues, correspondant à 11 pays : Allemagne, Autriche, Danemark, Etats-Unis, Finlande, Hongrie, Norvège, Pays-Bas, Québec/Canada, Royaume-Uni et Suisse. Aucune réponse n'a été reçue de l'Italie et de la Russie. Cette consultation a permis de préciser principalement le cadre législatif relatif à ces activités. Les principales approches sont décrites par la suite en explicitant les réponses autour de quatre thèmes particulièrement d'intérêt dans la saisine, à savoir l'encadrement législatif des recycleurs, de la pratique de l'apnée professionnelle, de l'utilisation des mélanges gazeux et de leur contamination. Il est à souligner que les informations recueillies ne sont pas exhaustives et reposent sur les éléments communiqués par les personnes consultées par voie électronique et sur des compléments d'information obtenues sur certains sites Internet des organismes ou institutions concernés.

<u>Dispositions générales de l'encadrement du travail en milieu hyperbare</u>

Il ressort de cette consultation qu'il existe un cadre législatif, parfois abondant pour certains pays, et normatif visant à encadrer la pratique professionnelle en conditions hyperbares. Les réglementations ont commencé à être introduites durant les années 1970 et 1980, centrées sur la planification des activités, l'examen régulier des équipements et la production de certificats afin de vérifier que le travail était réalisé correctement. Les textes requéraient l'utilisation obligatoire de certains équipements, la planification et l'organisation des activités professionnelles.

Bien que les réglementations varient, la philosophie en termes de prévention reste analogue. De manière parcellaire, la suite de ce paragraphe décrit les principes édités par les textes réglementaires ou normes internationales. Ces documents présentent souvent des grandes lignes

directrices et se centrent principalement sur l'air et non les mélanges gazeux (même si les recommandations sont parfois voire souvent applicables quelque soit le mélange gazeux).

A titre d'exemple, de nombreuses normes publiées par l'IMA (International Marinelife Alliance) ou l'International Marine Contractors Association (IMCA) visent les opérations de plongée professionnelle et définissent les règles de sécurité qui s'y appliquent. Elles traitent des équipements nécessaires à la plongée autonome, non autonome, en eau profonde et dans des environnements contaminés (par des produits chimiques, biologiques ou radioactifs). L'International tunneling and underground space association (ITA) a par exemple édité divers guides repris dans les préconisations ou les réglementations nationales.

En termes de réglementation et de rapports scientifiques sur les activités professionnelles en conditions hyperbares, les deux contributions les plus riches issues de cette consultation proviennent incontestablement des correspondants du Royaume Uni et du Québec.

Au Royaume-Uni, les activités professionnelles de plongée sont conduites sous une réglementation datée de 1997 (the Diving at Work Regulations 1997 (DWR97 No. 2776). Des guides d'application ont été déclinés aux différents secteurs de la plongée professionnelle sous la forme de « Approved Codes of Practice" (ACoPs) ». Il existe 5 ACoPs couvrant les activités de plongée dans les secteurs offshore, côtiers, récréatifs, médias, scientifiques et archéologiques.

AU Québec, la section XXVI.I relative au travail effectué en plongée (chapitre S-2.1, a. 223 / D. 425-2010, a. 3.) décrit et précise les contraintes en termes de conduite de ces travaux. Le texte s'applique à tout travail réalisé en plongée, à l'exception de quelques articles qui ne concernent pas la plongée policière. Néanmoins, il ne s'applique pas à l'enseignement et à la pratique de la plongée récréative, lesquels sont régis par la Loi sur la sécurité dans les sports. Ainsi, plusieurs chapitres traitent notamment des obligations de l'employeur et du plongeur, du mode de plongée selon certains travaux, de la composition de l'équipe de plongée, de la formation des membres de l'équipe de plongée, de l'âge minimal, de l'expérience du chef de plongée, des tâches du chef de plongée, du plongeur de soutien et de l'assistant du plongeur, du plan de plongée, du registre des plongées, *etc*.

Aux Etats-Unis, de manière analogue, il existe plusieurs textes réglementaires dont l' « Electronic code of federal regulations », destinés à prescrire les principes des activités de plongée, professionnelle principalement.

Dans d'autres pays, tels que les Pays bas, il existe un catalogue numérique sur les conditions de travail des professionnels exposés aux conditions hyperbares (*www.arbocataloguswoo.nl*). Ce catalogue décrit comment contrôler les risques pour la santé et la sécurité des travailleurs dans un secteur spécifique de l'entreprise. Les guides sont issus d'un accord entre les partenaires sociaux. Ce catalogue couvre les secteurs professionnels de la réalisation des travaux subaquatiques, de la médecine hyperbare, le travail en caisson et les autres travaux réalisés dans des conditions hyperbares. Il s'applique à tous les employeurs et employés impliqués dans la réalisation de travaux hyperbares, excepté les activités de plongée effectuées par les sapeurs-pompiers. Ce catalogue recense de la manière la plus exhaustive possible, les risques qui peuvent se produire lors de la mise en œuvre des interventions en conditions hyperbares. Pour tous les risques identifiés sont définies les mesures de contrôle minimum que doivent prendre l'employeur et l'employé pour gérer ces risques. Le décret relatif aux conditions de travail (*Working Conditions Decree / Decree of 15 January 1997, including provisions in the interest of health, safety and welfare in connection with work*) contient des recommandations spécifiques en lien avec des activités professionnelles en conditions hyperbares, notamment dans le chapitre 6 (facteurs physiques), section 5 (travaux en conditions hyperbares).

Il existe des textes réglementaires allemands (*Verordnung über Arbeiten in Druckluft (Druckluftverordnung – DruckLV, Réglement allemand sur le travail dans l'air comprimé du 4 Octobre 1972 (Journal officiel fédéral I, p 1909) modifié en dernier lieu par l'article 6 du décret du 18 décembre 2008 (Journal officiel fédéral I, p 2768)*) en lien avec des activités en conditions hyperbares, malheureusement aucune traduction n'est disponible. Les règles pour la sécurité au travail sur les chantiers de construction (RAB : Regeln zum Arbeitsschutz auf Baustellen) reflètent l'état de l'art en matière de sécurité et protection de la santé des travailleurs. Ces règles sont

établies par la commission de protection de la sécurité et de la santé sur les chantiers de construction (ASGB) et sont régulièrement mises à jour par ce comité. Les RAB sont publiés par le Ministère fédéral de l'économie et du travail dans la revue fédérale (bundesarbeitsblatt). Le document « RAB 25 » contient des recommandations relatives au travail hyperbare à l'air comprimé.

Le travail en conditions hyperbares en Autriche est encadré par la loi sur la santé et la sécurité au travail (ArbeitnehmerInnenschutzgesetz - ASchG) et les règlements associés, documents uniquement disponibles en langue allemande. Le règlement autrichien sur ces questions est le "Druckluft-und Taucherarbeiten-Verordnung" (ordonnance sur les travaux dans l'air comprimé et la plongée), il s'agit du règlement relatif à la protection de la vie et de la santé des salariés effectuant des travaux dans l'air comprimé ainsi que des travaux sous-marins (plongeurs).

Le correspondant de la STAMI (l'institut de santé au travail norvégien) a indiqué que l'autorité de sureté du pétrole en Norvège (Petroleum Safety Authority Norway) est responsable de la réglementation et la supervision des activités de plongée professionnelle dans l'industrie pétrolière sur le plateau continental norvégien et aux terminaux terrestres. Aucun document n'a été recueilli dans le cadre de cette consultation.

Pour la Finlande, le FIOH (Finish Institute for Occupational Health), l'Institut finlandais de santé au travail, a répondu que la réglementation sur le travail en conditions hyperbares est quasi inexistante et seuls quelques aspects sont intégrés dans les règlements/recommandations encadrant la plongée et qui pour la plupart, concernent des actions militaires.

En Hongrie, seul un décret du Ministère de la santé réglemente les conditions du travail en caissons. Orienté sur les caissons hyperbares en milieu médical (chambres thérapeutiques hyperbares), ce texte est en vigueur depuis 1997 et régulièrement actualisé depuis (version du texte disponible en langue hongroise).

En Suisse, il existe une ordonnance, plutôt d'orientation générale, concernant les mesures techniques de prévention des accidents et des maladies professionnelles lors de travaux dans l'air comprimé, datée du 20 janvier 1961 et réactualisée depuis.

Ainsi, suite à cette consultation, de nombreuses références ont été recueillies et recensent pour différents pays, les principes d'organisation, de responsabilité, de formation, de sécurité du matériel, *etc.* des activités professionnelles en conditions hyperbares. Plusieurs textes ou normes évoquent les mélanges gazeux autres que l'air ainsi que les contrôles visant à éviter la contamination des mélanges respiratoires (mélanges de gaz ou air). Quelques éléments ont également pu être collectés concernant les recycleurs, les correspondants répondant que les consignes ou les prescriptions s'appliquant au matériel et à l'équipement s'étendent *de facto* aux recycleurs. Enfin, peu voir aucun élément n'a été transmis concernant l'encadrement de l'apnée professionnelle.

Recycleurs

Il existe peu de réglementation relative aux recycleurs. Les institutions consultées nous indiquent néanmoins de manière générale que les prescriptions de contrôle, d'entretien pour les équipements ainsi que les limites de profondeur concernant les plongées en scaphandre autonome en circuit ouvert, s'appliquent *de facto* aux recycleurs.

La réglementation la plus riche et la plus explicite sur le sujet est issue du Code of Federal Regulations (CFR) des Etats Unis. Il s'agit de la codification des règles et des règlements généraux et permanents publiés dans le Federal Register par les Ministères et organismes exécutifs du gouvernement fédéral des États-Unis. L'Appendix C to Subpart T of Part 1910 (*Alternative Conditions Under §1910.401(a)(3) pour les instructeurs de plongées récréatives et les guides de plongées*) précise l'équipement requis pour les recycleurs. L'employeur doit s'assurer que chaque employé utilise le recycleur selon les instructions du fabricant de l'appareil.

L'employeur doit s'assurer que chaque recycleur possède un sac respiratoire fournissant un volume suffisant de gaz respiratoire à leurs plongeurs, ceci afin de répondre à la ventilation des

plongeurs, et contient un système de chicanes et/ou tout autre système de séparation de l'humidité.

L'employeur doit placer un piège d'humidité dans la boucle respiratoire du recycleur, et veiller à ce que : (i) Le fabricant de recycleur approuve à la fois le piège d'humidité et son emplacement dans la boucle respiratoire ; et (ii) chaque employé utilise le piège d'humidité selon les instructions du fabricant du recycleur.

L'employeur doit s'assurer que chaque recycleur dispose d'un capteur d'humidité fonctionnant en continu, et que : (i) le capteur d'humidité se connecte à une alarme visuelle (par exemple, numérique, graphique, analogique) ou sonore (par exemple la voix), facilement détectable par le plongeur dans les conditions de son intervention en plongée, et le met en garde en cas de présence d'humidité dans la boucle respiratoire avec un délai suffisant pour mettre fin à la plongée et retourner en toute sécurité à la surface ; et (ii) chaque plongeur utilise le capteur d'humidité selon les instructions du fabricant du recycleur.

L'employeur doit s'assurer que chaque recycleur contient un capteur de CO_2 fonctionnant en continu dans la boucle de la respiration, et que : (i) le fabricant de recycleur approuve l'emplacement du capteur de CO_2 dans la boucle respiratoire ; (ii) le capteur de CO_2 est intégré avec une alarme qui fonctionne selon un mode visuel (par exemple, numérique, graphique, analogique) ou sonore (par exemple la voix), facilement détectable par chaque plongeur dans les conditions de plongée ; et (iii) l'alarme reste activée en permanence lorsque le niveau de CO_2 inhalé atteint et dépasse 0,005 ATA.

Avant les opérations quotidiennes de plongée, et plus souvent si nécessaire, l'employeur doit étalonner le capteur de CO_2 selon les instructions du fabricant du capteur, et veiller à ce que : (i) le matériel et les méthodes utilisées pour réaliser cet étalonnage présentent une variabilité de 10 % autour d'une concentration de CO_2 équivalente ou inférieure à 0,005 ATA ; (ii) le matériel et les procédures maintiennent cette précision tel que requis par les instructions du fabricant du capteur.

L'employeur doit remplacer le capteur de CO_2 lorsqu'il ne répond pas aux exigences de précision visées au paragraphe ci dessus de l' annexe , et veiller à ce que le capteur de remplacement de CO_2 soit conforme aux exigences de précision visées avant de placer le recycleur en fonctionnement .

De manière alternative à l'utilisation d'un capteur de CO_2 fonctionnant en continu, l'employeur peut utiliser un calendrier pour le remplacement du matériau absorbant le CO_2 (chaux sodée). Fourni par le fabricant du recycleur, ce calendrier détermine une durée d'utilisation du matériau absorbant. L'employeur ne peut utiliser un tel calendrier que s'il respecte les conditions de température pour lesquelles ce calendrier a été développé par le fabricant. Lors de l'utilisation des calendriers de remplacement des absorbants de CO_2, l'employeur doit s'assurer que chaque recycleur utilise une cartouche d'épuration commercialisée et jetable contenant un matériau absorbant de CO_2 et que chacune : (i) est approuvée par le fabricant de recycleur ; (ii) élimine le CO_2 du gaz expiré par le plongeur ; et (iii) maintienne le niveau de CO_2 dans le gaz respirable en dessous d'une pression partielle de 0,01 ATA.

De manière alternative aux cartouches d'épuration commercialisées et jetables, l'employeur peut remplir les cartouches d'épuration de CO_2 manuellement avec un matériau absorbant le CO_2 lorsque : (i) le fabricant de recycleur permet un remplissage manuel des cartouches d'épuration ; (ii) l'employeur remplit les cartouches d'épuration selon les instructions du fabricant du recycleur ; (iii) l'employeur remplace le matériau absorbant le CO_2 en utilisant un calendrier de remplacement et (iv) l'employeur démontre que le remplissage manuel répond aux exigences.

L'employeur doit s'assurer que chaque recycleur dispose d'un module d'information fournissant : (i) un affichage visuel (par exemple, numérique, graphique, analogique) ou sonore (par exemple, la voix), prévenant efficacement le plongeur d'un dysfonctionnement du solénoïde et d'autres défaillances électriques (par exemple, faible tension de la batterie) ;(ii) pour un recycleur en circuit semi-fermé, un affichage visuel de la pression partielle de CO_2, ou de l'intervalle de la pression partielle de CO_2 autour de 0,005 ATA ; et (iii) pour un recycleur en circuit fermé, un affichage visuel pour les pressions partielles d'oxygène et de CO_2, ou les intervalles de pression partielle de CO_2

(0,005 ATA) et d'O_2 (1,40 ATA); la température des gaz dans la boucle de respiration et la température de l'eau.

Avant les opérations quotidiennes de plongée, et plus souvent si nécessaire, l'employeur doit s'assurer que l'alimentation électrique et les circuits électriques et électroniques dans chaque recycleur fonctionnent comme requis par les instructions du fabricant de l'appareil.

Conditions spéciales pour les recycleurs à circuit fermé

L'employeur doit s'assurer que chaque recycleur en circuit fermé utilise des capteurs de pression d'alimentation pour l'oxygène et les gaz diluants (air ou azote), ainsi que des capteurs en continu pour la température de la boucle de gaz et de l'eau.

L'employeur doit veiller à ce que : (i) au moins deux capteurs d'oxygène se trouvent dans la boucle de respiration ; et (ii) les capteurs oxygène fonctionnent en continu ; ajustés à la température et approuvés par le fabricant de recycleur.

Avant les opérations quotidiennes de plongée, et plus souvent si nécessaire, l'employeur doit étalonner les capteurs d'oxygène tel que requis par les instructions du fabricant du capteur. Pour ce faire, l'employeur doit : (i) veiller à ce que le matériel et les procédures utilisés pour effectuer l'étalonnage soient exacts à 1 % de la fraction volumétrique d'oxygène ; (ii) maintenir cette précision tel que requis par le fabricant de l'équipement d'étalonnage ; (iii) veiller à ce que les capteurs soient exacts à 1 % de la fraction volumétrique d'oxygène ; (iv) remplacer les sondes d'oxygène quand elles ne répondent pas aux exigences de précision visées ci dessus ; et (v) veiller à ce que les capteurs de remplacement d'oxygène répondent aux exigences de précision avant de placer un recycleur en fonctionnement.

Il existe aussi des indications relatives au protocole d'essai pour la détermination des limites de CO_2 pour les canisters des recycleurs. Pour rappel, le canister est un dispositif filtrant le CO_2 issu de la ventilation du plongeur. L'employeur doit s'assurer que le fabricant de recycleur a utilisé les procédures détaillées dans le point 11 de l'annexe afin de déterminer la conformité du matériau absorbant.

Par ailleurs, il existe d'autres prescriptions sur l'évacuation d'urgence, quelque soit le type d'équipement de plongée utilisé par un plongeur (en l'occurrence en circuit ouvert ou recycleurs). Les éléments sont détaillés au point 7 de l'annexe et concernent notamment une alimentation séparée en gaz respiratoire de secours. Enfin, le point 10 décrit les obligations de formation du plongeur tant pour la plongée en circuit ouvert qu'en recycleurs.

Mélanges gazeux respiratoires

Concernant les mélanges gazeux respiratoires, les réglementations, lignes directrices ou normes établissent des prescriptions ou procédures générales en termes de contrôle, de sécurité afin d'éviter tout accident et garantir la pureté de l'air ou du mélange pour le travailleur lors des activités réalisées.

A titre d'exemple, le HSE, dans une plaquette d'information intitulée « Breathing gas management / Checking contents of breathing mixtures », évoque des recommandations et obligations pour la vérification des mélanges respiratoires. D'après le HSE, malgré la rigueur des entreprises d'approvisionnement dans le contrôle des mélanges respiratoires de plongée, l'historique indique qu'il peut exister des erreurs d'étiquetage. Ainsi, tous les mélanges respiratoires de plongée doivent être vérifiés à la réception, et revérifiés immédiatement avant de les connecter à une alimentation en gaz de plongée ou un appareil respiratoire.

D'après un correspondant de la SUVA (Swiss Accident Insurance), le gouvernement suisse prépare la rédaction d'une nouvelle loi concernant les activités professionnelles en conditions hyperbares avec une échéance prévue pour 2015. Cette nouvelle réglementation prévoirait notamment la rédaction d'un règlement sur les mélanges gazeux respiratoires et les pressions partielles maximales autorisées soit 1,4 bar pour l'oxygène, 4,0 bars pour l'azote.

Le règlement sur la santé et la sécurité au travail canadien, et plus précisément la section XXVI.I relative au travail effectué en plongée, indique que les mélanges doivent satisfaire aux exigences suivantes : (i) être composés de gaz présentant un degré de pureté d'au moins 99,5% ; (ii) l'oxygène, l'azote, l'hélium et tout autre gaz présents dans le mélange doivent être dosés selon les tables de plongée ou de décompression de l'Institut militaire et civil de médecine environnementale du ministère de la Défense nationale du Canada ; (iii) la concentration des contaminants présents dans le mélange ne doit pas excéder la concentration maximale prévue à la partie 2 de l'annexe X ; (iv) la concentration des contaminants autres que ceux prévus à l'annexe II ne doit pas atteindre le seuil de perception olfactive ou excéder 1/25 des valeurs d'exposition moyenne pondérées (VEMP) prévues à la partie 1 de l'annexe I ; (v) ne doivent comporter aucune particule d'une dimension supérieure à 0,3 µm ; (vi) doivent être exempts de toute odeur. Par ailleurs, pour l'oxygène pur, le règlement demande à ce qu'aucun plongeur en immersion ne respire de l'oxygène pur à une profondeur supérieure à 7,6 mètres, sauf pour la décompression ou à des fins thérapeutiques. L'oxygène utilisé doit présenter un degré de pureté de 99,5% et satisfaire aux exigences décrites aux paragraphes 3 à 6 de l'article 312.43.

L'AITES (Association internationale des tunnels et de l'espace souterrain) / ITA propose des lignes directrices concernant les bonnes pratiques de travail en atmosphère hyperbare à l'air comprimé (Guidelines for good working practice in high pressure compressed air, 2012). A titre d'exemple, le fournisseur doit être en mesure de démontrer que le contrôle de la pureté du gaz et des mélanges respiratoires stockés est conforme à un système d'assurance qualité ou conforme à une norme internationalement reconnue comme la norme ISO 9001. La pureté du gaz doit se conformer aux normes nationales dans le pays d'utilisation ou lorsqu'il n'y a pas, à une norme reconnue comme la version actuelle de la norme BS 8478 ou EN 12021. L'AITES propose également des recommandations concernant l'échantillonnage, les caractéristiques des mélanges des gaz, et l'échantillonnage spécifique pour la teneur en oxygène.

Aux Etats-Unis, l'Appendix C to Subpart T of Part 1910 (Alternative Conditions Under §1910.401(a)(3) pour les instructeurs de plongées récréatives et les guides de plongées) précise les conditions d'utilisation des gaz. Ainsi, concernant la concentration d'oxygène dans le gaz respiratoire, l'employeur doit veiller à ce que la fraction d'oxygène dans le mélange Nitrox soit supérieure à la fraction d'oxygène dans l'air comprimé (par exemple, supérieure à 22 % en volume) ; pour une utilisation en recycleur, la PpO_2 ne doit jamais dépasser 1,40 ATA.

Concernant les limites de non-décompression, pour la plongée effectuée en utilisant un mélange Nitrox, l'employeur doit s'assurer que chaque plongeur respecte les limites de non-décompression spécifiées dans divers divers documents (NOAA de 2001 ou le rapport intitulé «Développement et validation des procédures no-Stop décompression pour la plongée récréative : La DSAT (Diving Science and Technology) plongee Planner », publié en 1994 par Hamilton Research Ltd (connu généralement comme" 1994 DSAT sans décompression tableaux »).

Concernant, le mélange et l'analyse des gaz respiratoires, l'employeur doit veiller à ce que : (i) un personnel correctement formé réalise le mélange Nitrox, et que l'azote soit le seul gaz inerte utilisé dans un mélange de gaz respiratoire. Avant le début des opérations quotidiennes de plongée, l'employeur doit déterminer la fraction d'oxygène du mélange gazeux respiratoire en utilisant un analyseur d'oxygène. Lorsque le gaz de respiration est un mélange respiratoire de Nitrox commercialisé, l'employeur doit s'assurer que l'oxygène est conforme à certaines spécifications (USP médical ou aviator's breathing-oxygen specifications of CGA G-4.3-2000). En outre, le fournisseur commercial doit : (i) Déterminer la fraction d'oxygène dans le mélange de gaz respiratoire en utilisant une méthode analytique précise à 1 % de la fraction d'oxygène en volume ; (ii) réaliser l'analyse lors du mélange dans le réservoir et après avoir débranché le réservoir chargé; (iii) inclure de la documentation sur les procédures d'analyse de l'oxygène.

D'autres éléments, notamment dans le point 4 de l'annexe, ne couvrant pas uniquement les mélanges, détaillent la régulation de l'oxygène tant concernant son exposition que les profondeurs de plongée.

D'après Peter Neuhold du Ministère fédéral du travail, des affaires sociales et de la protection des consommateurs (Federal Ministry of Labour, Social Affairs and Consumer Protection), le travail en

conditions hyperbares en Autriche est encadré par la loi sur la santé et la sécurité au travail (ArbeitnehmerInnenschutzgesetz - ASchG) et les règlements associés. Le règlement autrichien sur ces questions est le "Druckluft-und Taucherarbeiten-Verordnung" (ordonnance sur les travaux dans l'air comprimé et la plongée). Il s'agit du règlement relatif à la protection de la vie et de la santé des salariés effectuant des travaux dans l'air comprimé ainsi que des travaux sous-marins (plongeurs). D'après le Ministère fédéral autrichien du travail, des affaires sociales et de la protection des consommateurs, le règlement autrichien sur ces questions, en l'occurrence le "Druckluft-und Taucherarbeiten-Verordnung" (ordonnance sur les travaux dans l'air comprimé et la plongée), précise que : (i) l'utilisation de mélanges gazeux respiratoires autres que l'air lors de la décharge est autorisée sur une base individuelle avec l'approbation du ministre fédéral de l'administration sociale, en tenant compte de la Loi fédérale consolidée ; concernant les équipements de plongée pour travaux, seuls l'air comprimé, l'oxygène ou un mélange des 2 peuvent être utilisés pour alimenter les casques ou les recycleurs ; le mélange doit être fait automatiquement ; et (iii) d'autres mélanges de gaz respiratoires peuvent être utilisés sous réserve d'obtenir le consentement délivré au cas par cas du ministre des Affaires sociales.

D'après le BG BAU (Berufsgenossenschaft der Bauwirtschaft), la caisse mutuelle allemande d'assurance accident pour les travailleurs du domaine de la construction, la décompression à l'oxygène pur (100%) hyperbare est obligatoire après un travail en air comprimé. Les expositions à l'air comprimé sont limitées à une pression de 3,6 bars (manomètre). Les règlements concernant la plongée professionnelle (milieu immergé) limitent à 5,0 bars la pression maximale autorisée en plongée à l'air comprimé. Si un projet nécessite une exposition des travailleurs à une pression comprise entre 3,6 et 5,0 bars, il est possible d'utiliser des tables de plongée avec décompression à l'oxygène. L'utilisation de ces tables de plongée à l'air comprimé est néanmoins soumise à une autorisation spéciale délivrée sur demande par les autorités compétentes. La demande doit être fondée sur une expertise particulière réalisée par un médecin hyperbare et doit inclure le détail des tables de décompression adaptées pour des conditions d'exposition particulières (décrites également). Il n'existe pas de directives allemandes officielles pour l'utilisation de mélanges gazeux respiratoires autres que l'air ou l'utilisation de méthodes de plongée à saturation.

Apnée

La plupart des réponses recueillies furent négatives sur l'existence d'un encadrement de la plongée en apnée, qu'il soit réglementaire ou normatif. En Suisse, le document 2869 de la SUVA, mentionne sans autre précision, qu'aujourd'hui encore les pêcheurs d'éponges et de perles pratiquent cette méthode dans le cadre professionnel. D'après le correspondant du NIOSH, les organismes fédéraux (par exemple, la Garde côtière des États-Unis, *etc.*) et des États exigent l'utilisation de pavillons de plongée (par exemple, l'alpha drapeau pour la plongée depuis un bateau, trois feux ronds dans une position verticale, *etc.*) pour la plongée en circuit-fermé et l'apnée (cf *http://www.dive-flag.com/law.html* et *http://www.navcen.uscg.gov/?pageName=navRulesContent # rule27*).

Les éléments les plus précis concernent le Québec à travers le règlement sur la santé et la sécurité au travail (SECTION XXVI.I – travail effectué en plongée) et plus précisément les sections 312.19 et 312.20 relatives à la plongée en nage libre et la plongée en compagnonnage. Concernant la première, le texte précise que lorsque la ligne de sécurité du plongeur risque de se coincer ou de s'emmêler, le chef de plongée peut, à défaut de ne pouvoir mettre en œuvre aucune autre méthode de travail, autoriser celui-ci à plonger en nage libre, à la condition qu'il soit accompagné sous l'eau d'un plongeur relié à la surface par une ligne de sécurité et qui maintient un contact visuel permanent avec le plongeur en nage libre. Dans le cas où la ligne de sécurité du plongeur accompagnateur risque aussi de se coincer ou de s'emmêler, le chef de plongée peut autoriser les 2 plongeurs à plonger en compagnonnage conformément à l'article 312.20. La plongée en compagnonnage est définie comme toute plongée effectuée par équipe de 2 plongeurs en nage libre qui assurent mutuellement leur sécurité. Lors de cette plongée, les plongeurs doivent respecter les prescriptions suivantes : (i) établir un code de communication par signaux manuels à utiliser en cas d'urgence ou en cas de défaillance du système de communication vocale ; (ii)

maintenir un contact visuel constant entre eux durant toute la durée de la plongée ; (iii) mettre fin immédiatement à la plongée dès que l'un des plongeurs remonte à la surface ; (iv) mettre en application les mesures d'urgence prévues au plan de plongée dès que l'un des plongeurs ne répond pas à un signal ; (v) être reliés à la surface par une corde fixée à une bouée qui doit être constamment visible et surveillée afin de permettre qu'une aide immédiate soit apportée aux plongeurs en cas d'urgence.

Contamination des gaz

Le document de la SUVA, s'attachant à décrire les exigences posées à la médecine de plongée et des milieux hyperbares dans le cadre professionnel, décrit les effets des gaz irritants et toxiques qui peuvent être libérés ou se former sur les chantiers en milieu hyperbare ou être présents sous forme d'impuretés dans les gaz respiratoires. Le document évoque notamment le cas des brouillards d'huile qui contaminent accidentellement l'air comprimé et peuvent causer des problèmes respiratoires ; ou le CO_2, dont la teneur est susceptible d'augmenter en cas d'insuffisance de la capacité des absorbeurs d'un recycleur ou d'un habitat subaquatique, si l'espace mort est trop important dans un casque ou autre appareil alimenté par un tuyau ou encore si l'air comprimé est pollué par des gaz d'échappement.

Certains guides, documentations ou réglementations prescrivent des procédures ou des limites pour la contamination des gaz stockés. D'après le « Electronic code of federal regulations », l'air respirable fourni à un plongeur ne doit pas contenir :

- Un niveau de monoxyde de carbone (CO) supérieur à 20 ppm ;
- Un niveau de dioxyde de carbone (CO_2) supérieur à 1000 ppm ;
- Un niveau de brouillard d'huile supérieur à 5 $mg.m^{-3}$ ou ;
- Une odeur nocive ou prononcée.

D'après le HSE, la qualité des gaz respiratoires stockés doit respecter au Royaume-Uni la norme EN12021 sur la protection contre les substances dangereuses pour la santé. Cette norme est actuellement en cours de révision et concernera notamment la qualité des gaz respiratoires tels le Nitrox et le Trimix. Actuellement, la norme EN12021 définit des prescriptions sur la qualité de l'air :

- Teneur en oxygène 21% (à plus ou moins 1%) ;
- La teneur en CO_2 doit être inférieure à 500 ppm ;
- La teneur en CO doit être inférieure à 15 ppm ;
- Il ne doit pas exister d'eau liquide libre, le point de rosée doit être suffisamment bas pour éviter toute condensation et givrage, soit -5°C par rapport à la température la plus basse. Si celle-ci n'est pas connue, le point de rosée doit être inférieur à -11°C ;
- Il ne doit pas y avoir d'odeur ni de goût significatif ;
- La teneur en huile doit être inférieure à 0,5 ppm. Si un lubrifiant synthétique est utilisé pour la compression voir les limites légales d'exposition ;
- En fonction du type d'impureté voir les limites légales d'exposition.

3 Effets sanitaires et accidentologie liés à la pratique d'une activité professionnelle en conditions hyperbares

3.1 Etiologie/déterminants : le risque hyperbare en général

Tout travailleur hyperbare est soumis aux risques inhérents à son activité auxquels s'ajoutent les risques spécifiques liés à l'environnement hyperbare.

Sous le terme générique de « Risques hyperbares » se regroupent des manifestations pathologiques aiguës ou chroniques (barotraumatismes, intoxications dues aux gaz inhalés, accidents de désaturation…), de sévérité variable (de la simple gêne au niveau des oreilles jusqu'au décès), apparaissant pendant ou après un séjour à une pression supérieure à la pression atmosphérique. Ce séjour en pression peut se dérouler en atmosphère sèche ou en milieu humide.

Les conditions de travail en milieu hostile (milieu aqueux, souterrains, activités de soudage, *etc*) peuvent également entraîner des risques qui leurs sont propres.

3.2 Généralités sur les effets sanitaires liés à la pratique d'une activité professionnelle en conditions hyperbares

Le recensement des effets sanitaires généraux liés à la pratique d'une activité professionnelle en conditions hyperbares s'appuie sur la consultation d'ouvrages ou d'articles de référence généraux (Broussolle *et al*., 2006 ; Doolette et Mitchell, 2011 ; Weist *et al.*, 2012).

3.2.1 Définition d'un effet d'adaptation et d'un effet néfaste pour la santé

Le risque hyperbare est lié à l'adaptation de l'organisme aux variations de la pression extérieure ainsi qu'aux variations de pressions partielles des différents gaz respirés.

Toute variation d'un ou plusieurs de ces paramètres peut entraîner des perturbations plus ou moins graves, avec toutefois une certaine marge de tolérance de l'organisme, voire même d'accoutumance. Ainsi un effet d'adaptation n'entrainera pas nécessairement un effet néfaste sur l'organisme humain.

Dans ce chapitre ne sont recensés que les effets néfastes associés à la pratique d'une activité professionnelle en conditions hyperbares. Les accidents liés à l'environnement d'intervention (noyade en plongée, faunes et flores dangereuses pour le plongeur, accidents liés aux explosions…) ne seront pas traités dans ce chapitre.

3.2.2 Effets des variations des pressions (barotraumatismes)

En conditions hyperbares, l'organisme du travailleur subit l'augmentation de la pression ambiante et ses variations. Lors de la phase de compression, l'élévation de la pression relative entraîne une diminution des volumes gazeux selon la loi de Boyle & Mariotte (Pression x Volume = constante) et inversement lors de la phase de décompression.

En conséquence, toutes les cavités aériques du corps humain (naturelles : sinus, oreille moyenne, poumon, estomac, intestin et/ou pathologiques : carie dentaire, laryngocèle, emphysème…) peuvent être concernées. Ces variations de pression et donc de volume, peuvent être responsables de lésions ou blessures d'intensité plus ou moins sévère qualifiées de barotraumatismes ou accidents barotraumatiques.

Lors de la phase de compression, ces barotraumatismes peuvent survenir au niveau des oreilles, des sinus et de la face (placage de masque) ; lors de la décompression ils peuvent apparaitre au niveau des poumons, des oreilles, des sinus, des dents, des intestins et de l'estomac.

3.2.2.1 Effets sur la sphère oto-rhino-laryngée (O.R.L.)

Barotraumatisme de l'oreille

❖ ***Généralités***

Les barotraumatismes de l'oreille peuvent survenir au cours de la phase de compression ou de décompression. Ce sont des accidents fréquents qui se manifestent à différents niveaux de gravité, indépendamment du milieu d'intervention (sec ou immergé) ou du mode d'intervention (caisson, scaphandre autonome ou apnée).

L'oreille se compose de 3 parties : l'oreille externe qui comprend le pavillon, le conduit auditif externe et le tympan ; l'oreille moyenne qui comprend le marteau, l'enclume, l'étrier et la trompe d'Eustache ; l'oreille interne qui regroupe le labyrinthe avec en particulier les canaux semi-circulaires, la cochlée et les nerfs vestibulaire et cochléaire (cf Figure 20).

Le tympan est la membrane qui sépare le conduit auditif externe de l'oreille moyenne.

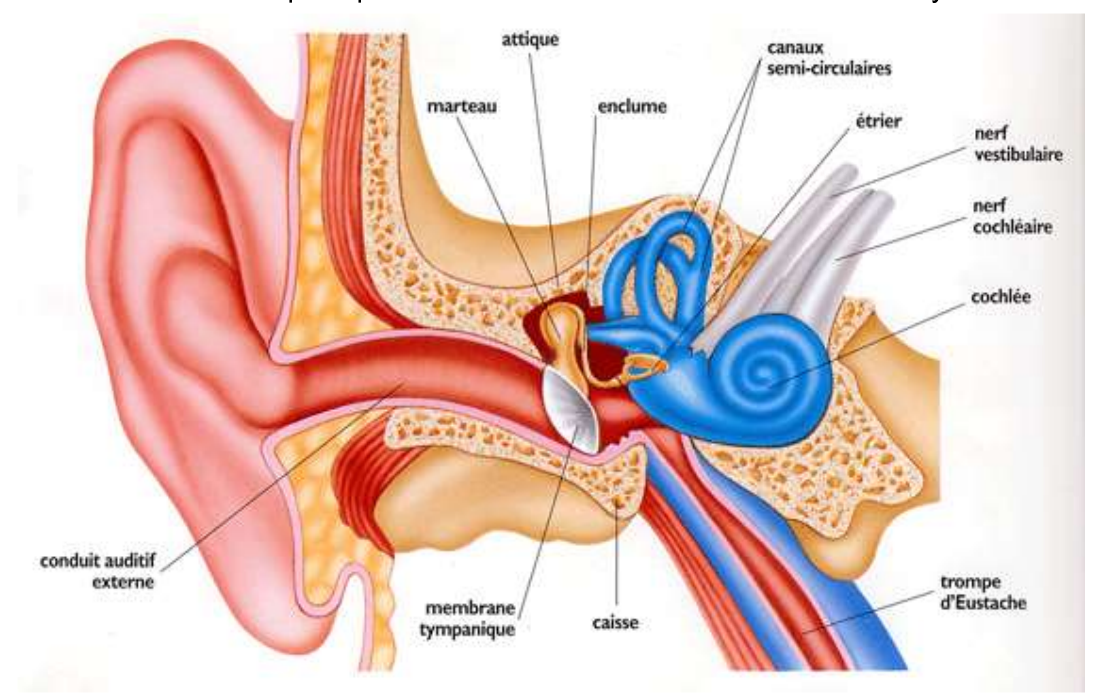


Figure 20 : Anatomie de l'oreille

(Source : Internet ; http://dangersduson.free.fr/oreille.htm)

❖ ***Barotraumatisme de l'oreille moyenne***

Les barotraumatismes de l'oreille moyenne (ou otites barotraumatiques) se manifestent le plus souvent lors de la phase de compression (à la descente en plongée). Ils sont causés par une compression trop rapide ou sont liés à un dysfonctionnement de la fonction équipressive de la trompe d'Eustache. Une dépression se crée alors dans la caisse du tympan ; la différence de pression entre l'oreille moyenne et l'oreille externe entraîne une déformation du tympan jusqu'à sa limite d'élasticité et induit des lésions sur la membrane tympanique. Ces lésions s'accompagnent systématiquement d'une otalgie dont l'intensité varie de la simple gêne à une douleur pouvant conduire à la syncope.

Ces lésions sont classées suivant 5 stades otoscopiques de sévérité en fonction de l'aspect de la membrane tympanique à l'otoscopie (classification de Haines et Harris, modifiée par Riu et Flottes) :

I) Hyperhémie localisée au manche du marteau ;

II) Hyperhémie diffuse du tympan présentant une rétraction globale ;

III) Epanchement séreux dans la caisse du tympan avec présence de bulles rétro tympaniques ;

IV) Stade précédent auquel s'ajoute un hémotympan ;

V) Perforation de la membrane tympanique avec possibilité d'otorragie.

Les premiers signes sont concomitants de l'incident. Généralement, le patient se plaint d'une douleur d'oreille plus ou moins intense apparue lors des variations de pression. À la sortie, il ressent une sensation d'eau dans l'oreille.

Les stades I et II guérissent spontanément en quelques jours, les stades III, IV et V nécessitent une prise en charge médicale et un traitement approprié ; l'otite barotraumatique peut se compliquer d'une paralysie faciale périphérique ou d'une atteinte cochléovestibulaire.

Le vertige alternobarique se manifeste par un vertige transitoire lors de la remontée secondaire à un déséquilibre de pression entre les deux oreilles moyennes. Il cède immédiatement lorsque le plongeur redescend de quelques mètres.

❖ ***Barotraumatisme de l'oreille interne***

Les barotraumatismes de l'oreille interne sont liés à une surpression brutale des liquides labyrinthiques par transmission d'un barotraumatisme de l'oreille moyenne vers l'oreille interne. Cette surpression qui survient en phase de compression (à la descente en plongée) est susceptible d'entrainer des lésions de l'oreille interne (vestibulaires et cochléaires).

Dans la majorité des cas, il s'agit de barotraumatismes dit « mixtes » qui se manifestent par des signes d'atteinte de l'oreille moyenne (otalgie) associés aux signes d'atteinte de l'oreille interne (nausées, vomissements, hypoacousie sévère, acouphènes, vertiges…). Dans certains cas, les barotraumatismes peuvent être directement transmis à l'oreille interne sans atteinte du tympan et des osselets, il s'agit alors de barotraumatismes dit « directs ».

La diminution des capacités auditives nécessite un traitement en urgence, au risque de devenir irréversible. Si le délai de mise en route du traitement est inférieur à 3 jours, la récupération est totale ou partielle dans 75 % des cas, mais passés 10 jours, les résultats sont mauvais avec séquelles définitives.

Avec ou sans séquelles, la reprise des activités hyperbares chez les travailleurs ayant subi ce type d'accidents n'est pas évidente puisque même après guérison, l'oreille interne demeure fragilisée. Suivant la nature et l'étendue des lésions, elle peut être envisagée, mais sous couvert de mesures prudentielles, notamment pour la plongée en apnée qui sollicite de manière plus violente l'oreille interne que la plongée en scaphandre autonome.

Barotraumatisme sinusien

Les barotraumatismes des sinus sont liés à une mauvaise équipression entre les sinus de la face et l'air ambiant présent dans les fosses nasales. Ils sont causés par l'association d'une obstruction de l'ostium sinusien (canal faisant communiquer le sinus avec la fosse nasale) dont l'origine est le plus souvent pathologique (inflammation de la muqueuse nasale, sinusite préexistante…).

Plus fréquent lors de la phase de compression (à la descente en plongée) mais bien souvent sans conséquence du fait de l'arrêt de mise en pression à l'apparition des premières douleurs, ils peuvent être problématiques et très douloureux à la remontée (à la décompression) car le gaz accumulé sous pression va provoquer des lésions en se détendant et en forçant l'ostium pour sortir.

Ils se manifestent par des douleurs faciales d'intensité variable (avec irradiation temporale ou dentaire possible) fréquemment associés à une épistaxis ou à un saignement oropharyngé. Ces signes sont parfois accompagnés de larmoiements, nausées ou troubles auriculaires (en cas d'association avec un barotraumatisme de l'oreille moyenne) voire à une perte de connaissance provoquée par l'intensité de la douleur.

Le traitement de ces accidents est le plus souvent symptomatique (antalgiques, vasoconstricteurs locaux…) et les complications sont peu fréquentes.

3.2.2.2 Barotraumatisme facial (placage de masque en plongée)

Le placage du masque survient lors de la phase de compression. Sous l'effet de l'augmentation de la pression hydrostatique, le volume gazeux à l'intérieur du masque diminue progressivement jusqu'à créer un effet de ventouse aspirant la peau, les yeux et le nez du plongeur.

Cet accident entraine des lésions de la face pouvant être associées à une épistaxis et un flou visuel. Ce tableau clinique peut être compliqué par des lésions oculaires ou nasales sous forme d'hémorragies ou d'hématomes ou des troubles persistants de la vision allant jusqu'à la cécité.

3.2.2.3 Barotraumatismes dentaires

Les barotraumatismes dentaires sont des douleurs dentaires ou parodentaires survenant lors d'une exposition aux conditions hyperbares. Elles peuvent être liées strictement aux variations de la pression ambiante ou relever d'autres cofacteurs associés.

Douleurs dentaires (odontalgies) barogéniques

Les odontalgies barogéniques sont liées à l'augmentation de la pression et touchent les dents cariées. Elles se manifestent par des douleurs d'intensité variable, apparaissant lors de la compression ou de la décompression, suivant l'importance de la carie.

Douleurs dentaires (odontalgies) pneumatiques

Les odontalgies pneumatiques sont causées par la fissuration ou l'implosion des prothèses dentaires ou matériaux de reconstitution lors de la décompression. Ce phénomène est dû aux variations des volumes gazeux contenus dans de microbulles, piégées à l'interface restauration/dent ou directement dans les matériaux de reconstitution.

Douleurs dentaires (odontalgies) vasculaires

Les odontalgies vasculaires ou syndrome dentaire des hautes pressions sont rares, multifactorielles, et ne touchent que les dents saines de certains plongeurs des grandes profondeurs.

Douleurs thermiques

Les algies dentaires thermiques sont liées à l'effet conjoint du froid ambiant et du froid provoqué par la détente des gaz respiratoires[5]. Ces douleurs se manifestent sur des dents lésées, cariées ou sur des matériaux de reconstitution métalliques de bonne conductivité thermique.

L'exposition dentaire au froid est importante lors de l'utilisation de scaphandre autonome à circuit ouvert ; en revanche, l'utilisation de recycleurs dans lesquels le gaz est réchauffé, limite l'apparition de ce type de douleurs.

Pathologie parodontale

Le parodonte correspond à l'ensemble des tissus de soutien de la dent ; il permet l'ancrage de la dent dans la mâchoire. Il est constitué de 4 tissus différents : la gencive, le cément, le desmodonte (ou ligament alvéolodentaire) et l'os alvéolaire (cf Figure 21 ci-dessous).

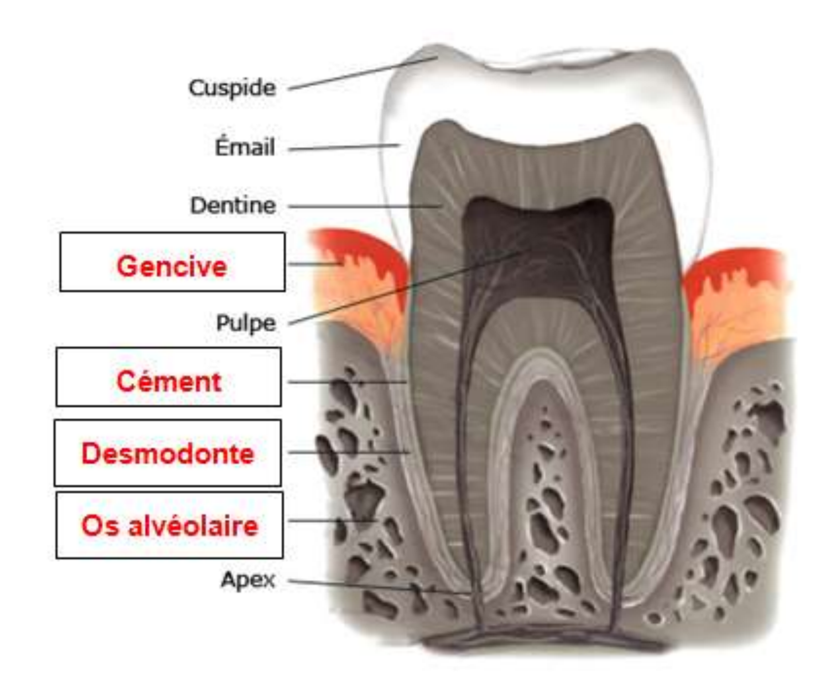


Figure 21 : Coupe longitudinale d'une dent humaine

(Source : Internet, http://www.maladie-parodontale.fr/index.html)

Les odontalgies d'origine parodontale sont liées au port de l'embout buccal : frottements causés par l'embout buccal, intolérance au caoutchouc qui le compose... Le desmodonte peut facilement devenir inflammatoire pour un plongeur sous l'action d'un embout buccal mal adapté. Ces odontalgies se manifestent par des douleurs d'intensité croissante, parfois pulsatiles et pouvant évoluer vers une mobilité dentaire.

---

[5] Pour rappel, le détendeur de plongée a pour fonction d'abaisser la pression du mélange gazeux contenu dans la bouteille de plongée, permettant au plongeur de respirer à la pression à laquelle il évolue. Ainsi, les gaz distribués par le détendeur sont froids car selon les lois de la thermodynamique, un gaz refroidit lorsque sa pression diminue.

3.2.2.4 Effets pulmonaires – Surpression pulmonaire

L'accident de surpression pulmonaire est le plus grave des barotraumatismes, puisqu'il peut mettre directement en jeu le pronostic vital de l'accidenté.

Lors de la décompression

Le barotraumatisme pulmonaire est causé par un déséquilibre entre la pression hydrostatique ambiante et la pression de l'air contenu dans les alvéoles pulmonaires. En application de la loi de Boyle-Mariotte, lors de la décompression, la pression du milieu ambiant diminue et le volume d'air intra-pulmonaire augmente. Cet accident survient lorsque la décompression a lieu sans évacuation de l'air contenu en excès dans les voies aériennes (blocage expiratoire) induisant une distension voire une rupture des alvéoles. Les gaz pulmonaires traversent la paroi de l'alvéole sous forme gazeuse non dissoute et peuvent se distribuer vers la plèvre, le médiastin, le péricarde, les tissus du cou et la circulation veineuse pulmonaire. Une embolie gazeuse systémique peut également survenir et être à l'origine de complications cardiaques et/ou neurologiques suivant l'endroit où va se localiser l'embole.

Dans la plupart des cas, les symptômes apparaissent dès le retour à la pression atmosphérique ou quelques minutes après. Les signes généraux observés le plus souvent sont malaise, angoisse, asthénie, pâleur, cyanose…, mais ne sont pas systématiques. Ils peuvent s'accompagner de signes pulmonaires (gêne respiratoire, douleurs thoraciques, hémoptysie, toux, dyspnée, pneumothorax, emphysème sous-cutané…) et plus rarement de signes neurologiques (perte de connaissance, déficit moteur, déficit sensitif, convulsions…), voire d'un état de choc.

Un accident de désaturation peut se surajouter à une surpression pulmonaire lorsque l'accidenté présente une saturation en gaz diluant non négligeable (non réalisation des paliers de décompression nécessaires) du fait de l'atteinte de l'appareil pulmonaire qui ne peut plus jouer correctement son rôle important de filtre.

Les origines de l'obstruction partielle ou totale de l'expiration durant la décompression sont multiples : physiologiques (spasmes réflexes de la glotte consécutifs à une panique ou une inhalation accidentelle d'eau), anatomiques (anomalies des bronches ou du parenchyme, asthme…), erreurs de procédures (décompression trop rapide, exercice de remontée sur expiration contrôlée[6]), et plus rarement techniques (blocage du détendeur à l'expiration).

En apnée, la respiration au fond sur l'embout d'un plongeur en scaphandre autonome suivie d'une remontée sans expiration ainsi que d'autres situations dont les mécanismes ne sont pas complètement élucidés exposent à ce type d'accidents.

L'évolution des formes pulmonaires strictes est généralement favorable. En revanche, pour les formes ayant une composante neurologique, l'évolution dépend principalement du délai de prise en charge de l'accidenté. Les formes les plus graves peuvent être à l'origine de séquelles neurologiques voire même conduire au décès.

Lors de la compression

Des barotraumatismes pulmonaires peuvent survenir de manière exceptionnelle chez les apnéistes, au cours de la phase de compression (à la descente), lorsque l'augmentation de la pression absolue provoque une redistribution des volumes sanguins périphériques vers le thorax consécutive à la chute des volumes gazeux intra pulmonaires (Francis et Denison, 1999). Ce phénomène, appelé « blood shift », est bénéfique dans les premières dizaines de mètres car il

[6] Mis en pratique lors de l'apprentissage de la plongée, l'exercice de remontée sur expiration contrôlée consiste à effectuer une remontée embout en bouche, en expiration constante, depuis une profondeur moyenne ; l'objectif est pour l'élève d'acquérir le réflexe de ne jamais bloquer sa respiration en remontant.

limite la compression de la cage thoracique. Toutefois, si le gradient de pression entre les capillaires et les alvéoles se majore, des lésions barotraumatiques de la membrane alvéolocapillaire peuvent se développer et aboutir à un œdème ou à une hémorragie intra-alvéolaire (West et Mathieu-Costello, 1992).

Les symptômes apparaissent à la sortie de l'eau et sont toux, dyspnée, expectoration mousseuse et rosée ou hémoptysie. L'évolution de ces accidents est très souvent favorable.

Pneumencéphalie

Le travailleur évoluant en conditions hyperbares peut également être victime d'une pneumencéphalie (gaz dans les méninges) (Barthélémy *et al.*, 2004).

La pneumencéphalie peut être consécutive à un barotraumatisme du sinus sphénoïdal, à une fistule cérébro-méningée post-traumatique ou à une hyperpneumatisation des os du crâne (Barthélémy *et al.*, 2004).

3.2.2.5 Barotraumatismes digestifs

En application de la loi de Boyle-Mariotte, lors de la décompression (à la remontée en plongée), le volume des gaz digestifs augmente et peut causer des troubles digestifs mineurs, voire dans des cas exceptionnels, des complications graves.

De façon exceptionnelle, la distension brutale d'un volume gazeux intra-gastrique entraîne la fermeture de l'angle de His et la coudure du bas œsophage contre le pilier droit du diaphragme ainsi que le ralentissement de la vidange pylorique (Coulange *et al.*, 2009).

Ce mécanisme peut être aggravé par une déglutition accidentelle d'eau de mer ou une sténose duodénale et provoquer un pneumopéritoine compliqué d'un aéroembolisme systémique (Righini *et al.*, 2010) plus ou moins associé à une rupture gastrique.

Troubles mineurs

Les troubles digestifs mineurs rapportés suite à une intervention en conditions hyperbares se manifestent par des distensions abdominales, des éructations, des vomissements ou encore des accès de coliques.

Il existe des variations interindividuelles de sensibilité vis-à-vis de ces troubles liées notamment à une hypotonie du muscle crico-pharyngien ou une difficulté d'équilibration des pressions de l'oreille moyenne entrainant une augmentation de la fréquence des déglutitions. Certains facteurs externes comme la consommation de boissons gazeuses ou d'aliments à l'origine d'une fermentation colique favorisent leur apparition en augmentant le contenu gazeux du tube digestif.

Ces manifestations sont bénignes et disparaissent après émission des gaz ou spontanément.

Rupture gastrique

La rupture gastrique est une complication digestive grave mais exceptionnelle de la pratique d'une activité en conditions hyperbares.

La distension brutale d'un volume gazeux intra-gastrique peut entraîner la fermeture de l'angle de His et la coudure du bas œsophage contre le pilier droit du diaphragme ainsi que le ralentissement de la vidange pylorique (Coulange *et al.*, 2009). Ce mécanisme peut être aggravé par une déglutition accidentelle d'eau de mer ou une sténose duodénale et provoquer un pneumopéritoine compliqué d'un aéroembolisme systémique (Righini *et al.*, 2010) plus ou moins associé à une rupture gastrique. Cette rupture se manifeste par une distension et des douleurs abdominales potentiellement accompagnées d'éructations, de vomissements voire d'hématémèse.

Le traitement est chirurgical et le pronostic bon, puisque 100% des patients recensés ont guéri.

3.2.3 Effets biophysiques des gaz : accidents de désaturation

3.2.3.1 Physiopathologie

Les accidents de désaturation sont des accidents dits « biophysiques », conséquence de l'application de deux lois physiques : la loi de Boyle-Mariotte et la loi de Henry.

Lors de la phase de compression, l'augmentation de la pression relative crée un gradient de pression entre la pression partielle des gaz neutres (azote et/ou hélium) contenus dans le mélange ventilé et la pression partielle des gaz neutres dissous dans l'organisme. Ces gaz passent alors la barrière alvéolocapillaire, c'est-à-dire la membrane qui sépare le poumon du sang, pour être distribué aux tissus par l'intermédiaire de la circulation systémique. La saturation est ainsi obtenue après un séjour en pression constante. Elle est caractérisée par un état d'équilibre entre la pression des gaz neutres alvéolaire et la pression de ces mêmes gaz dissous dans les tissus. Ce phénomène physique est décrit par la loi de Henry : "la quantité de gaz dissous dans un liquide est, à saturation, directement proportionnelle à la pression exercée par ce gaz à la surface du liquide".

Lors de la phase de décompression, le gradient de pression s'inverse et les gaz neutres se trouvant en sursaturation dans les tissus sont éliminés par la ventilation après avoir transités dans la circulation sanguine ; c'est la désaturation. Les vitesses de saturation/désaturation sont variables suivant les tissus : les tissus dits « courts » (sang, graisse…) se désaturent vite alors que les tissus dits « longs » (os et tendons), se désaturent plus lentement. Elle peut se faire de façon directe, le gaz dissous est alors éliminé au niveau de la barrière alvéolocapillaire, mais les gaz neutres peuvent également passer sous forme bullaire dans la circulation veineuse. Le mécanisme d'apparition des bulles reste encore imparfaitement élucidé. L'existence de noyaux gazeux à l'état basal chez l'homme et les phénomènes de cavitation pourraient faciliter la genèse des bulles (Blatteau *et al*., 2006).

Une vitesse de décompression trop rapide (un non-respect des paliers notamment) peut être à l'origine de la formation de bulles de tailles variables, susceptibles de provoquer des lésions tissulaires ou une obstruction vasculaire. Ces effets mécaniques directs des bulles sur l'organisme sont responsables des ADD.

Par ailleurs, l'ensemble des manifestations biologiques indirectes survenant à l'issue d'un accident de désaturation (amas plaquettaires, thromboses, vasoconstriction, stase circulatoire, extravasation, œdèmes interstitiels…) constituent la maladie de la décompression (MDD).

3.2.3.2 Clinique

Les symptômes de l'accident de désaturation dépendent principalement du tissu envahi par les bulles. Certaines manifestations sont caractéristiques, mais elles peuvent parfois être difficiles à reconnaître, silencieuses ou d'allure anodine.

Les accidents de désaturation sont très fréquents et contrairement aux idées reçues, ils ne sont pas nécessairement liés à des erreurs de procédures d'intervention en conditions hyperbares. Pour décrire ces accidents, la classification internationale oppose classiquement les accidents de type I dits bénins (accidents cutanés, ostéo-arthro-musculaires et malaise général), aux accidents de type II dits graves (accidents neurologiques, labyrinthiques et cardio-respiratoires). Dans la pratique, les accidents de type I peuvent évoluer vers des complications sérieuses.

Accidents de type I

Les accidents de type I sont liés dans la majorité des cas à un séjour sous pression de longue durée. Associés aux manifestations biologiques de la maladie de décompression, ils peuvent être les signes précurseurs d'un accident de gravité II.

❖ *Malaise général*

Le malaise général se manifeste par une asthénie intense (sensation d'épuisement) sans rapport avec l'effort fourni qui peut parfois s'accompagner d'une angoisse et de céphalées. Cette symptomatologie peut durer plusieurs heures et ne doit pas être prise à la légère car elle peut annoncer la survenue à retardement d'un accident neurologique.

❖ *Accidents cutanés*

Les accidents cutanés sont dus à la formation de bulles dans le derme et l'hypoderme. Ils se manifestent par des plages érythémateuses et œdémateuses et des éruptions papulo-maculeuses douloureuses avec boursouflures semblables à une crise d'urticaire, les « moutons ». Ces manifestations cutanées peuvent également prendre la forme de « puces » avec sensation superficielle de prurit ou de piqûre. Dans la plupart des cas, ces signes apparaissent dans l'heure qui suit le retour à la pression normale et disparaissent spontanément suivant le même délai.

❖ *Accidents lymphatiques*

Les accidents lymphatiques se manifestent lorsque les bulles formées lors de la décompression obstruent les vaisseaux lymphatiques. Le site situé en aval du lieu de l'obturation présente un œdème douloureux et aspect typique de « peau d'orange » traduisant l'absence de drainage lymphatique. Leur régression est spontanée en quelques jours.

❖ *Accidents ostéo-arthro musculaires*

Les accidents ostéo-arthro musculaires, communément appelés « bends » sont liés à la présence de bulles au niveau des os, des articulations, des cartilages et des muscles. Ils se déclarent le plus souvent au niveau d'une grosse articulation d'un membre sollicité lors de l'activité en conditions hyperbares. Ils touchent généralement l'épaule mais peuvent également affecter le genou, la hanche, le poignet ou la cheville.

Ces accidents apparaissent une fois le travailleur revenu à la pression normale et se manifestent par une douleur articulaire ou juxta-articulaire violente avec une sensation de broiement ou d'arrachement du membre atteint. La douleur n'est calmée par aucune position ni par un traitement antalgique et elle va s'estomper dans les 24 ou 48 heures suivant l'accident.

Un traitement approprié (oxygénothérapie hyperbare) entraîne une guérison totale et sans séquelles. En l'absence de prise en charge, un bend peut causer des dommages irréversibles dans une articulation ; lorsque l'atteinte est osseuse, elle risque par exemple d'évoluer vers une ostéonécrose. Par ailleurs, même si les symptômes disparaissent spontanément dans les 2 jours, la récidive est presque inévitable si l'accidenté replonge dans les dix jours, avec l'installation possible de lésions chroniques.

Accidents de type II

Les accidents graves de type II nécessitent une prise en charge extrêmement rapide et la recompression d'urgence. Leur évolution demeure néanmoins défavorable dans de nombreux cas.

❖ *Accidents neurologiques médullaires*

Les accidents neurologiques médullaires sont causés par des atteintes bullaires de la moelle épinière. Ils sont les plus fréquents des accidents de désaturation avérés et se manifestent sous de nombreuses formes cliniques, traduisant la complexité des mécanismes physiologiques sous-jacents.

Ces accidents se manifestent parfois de manière précoce, dans l'heure suivant le retour à la pression normale : il peut s'agir de violentes douleurs entre les omoplates ou au niveau des vertèbres lombaires mais également de simples fourmillements dans les membres, sensations d'ankylose ou de faiblesse musculaire. Ces signes précurseurs, évoluent vers une ataxie (trouble de la coordination des mouvements volontaires) suivie d'une perte partielle (parésie) voire totale

(paralysie) des capacités motrices d'une ou plusieurs parties du corps (« paraplégie du plongeur »). Les déficits neurologiques peuvent également s'installer silencieusement, en quelques heures, et l'évolution sera d'autant plus rapide que le travailleur a été soumis à une pression élevée (5 bars ou plus).

Les accidents neurologiques médullaires ne sont jamais bénins et même bien traités, peuvent être à l'origine de séquelles invalidantes (motrices, sensitives et sphinctériennes).

❖ ***Accidents neurologiques cérébraux***

Les accidents neurologiques cérébraux, plus rares que les accidents médullaires sont la plupart du temps la conséquence d'une embolie gazeuse cérébrale à l'origine de lésions du cerveau. Ils sont à différencier de la surpression pulmonaire.

Le tableau clinique dépend de la localisation de l'embole gazeux (emboles carotidiens, emboles vertébraux…). Il peut se composer de crises convulsives, de troubles moteurs (monoplégie, hémiplégie ou quadriplégie), de déficits sensitifs et/ou sensoriels (parole, vision) voire d'un coma associé à une détresse respiratoire sévère.

Ces accidents neurologiques bénéficient d'un meilleur pronostic que les accidents médullaires puisque les patients ayant reçu un traitement adapté guérissent sans séquelles dans 9 cas sur 10.

❖ ***Accidents labyrinthiques***

Les accidents labyrinthiques sont causés par une embolie gazeuse localisée dans l'oreille interne (branches de l'artère cochléo-vestibulaire ou liquides labyrinthiques). Ils sont à différencier des barotraumatismes de l'oreille interne.

Les manifestations cliniques sont caractéristiques et d'apparition précoce (possiblement lors des paliers de décompression). Elles se traduisent par des signes vestibulaires tels que des vertiges, nausées et vomissements, parfois accompagnés de signes cochléaires discrets tels un bourdonnement de l'oreille ou des sifflements (acouphènes).

❖ ***Accidents respiratoires***

Les accidents respiratoires, appelés également « Chokes », sont dus à la présence de bulles dans l'artère pulmonaire ou l'une de ses branches. Ils se manifestent classiquement par les signes pulmonaires d'une insuffisance respiratoire aiguë : dyspnée, gêne respiratoire avec oppression thoracique et douleur rétrosternale, toux paroxystique. Des expectorations saumonées sont le signe d'un stade avancé et doivent faire suspecter l'existence d'un œdème aigu pulmonaire (OAP). Ces symptômes sont d'apparition tardive après le retour à la pression normale.

3.2.4 Effets biochimiques des gaz

Les accidents d'origine biochimique sont la conséquence de l'application de la loi de Dalton. Lorsque la pression absolue augmente, les pressions partielles des gaz constituant le mélange gazeux augmentent dans les mêmes proportions.

La pression absolue correspond à la pression totale que subit le travailleur en milieu hyperbare. La pression partielle d'un gaz correspond au pourcentage de ce gaz dans le mélange gazeux respiré (exprimé en valeur décimale) multiplié par la pression absolue à laquelle est soumis ce mélange gazeux.

Les gaz respirés en conditions hyperbares peuvent devenir plus ou moins toxiques à certaines pressions partielles. Ces gaz peuvent être :

- les gaz métaboliques (oxygène, CO_2 d'origine endogène) ;
- les gaz diluants entrant dans la composition des mélanges gazeux respiratoires (azote, hélium) ;

- les gaz « polluants », introduits accidentellement (CO_2 d'origine exogène, CO, vapeurs d'huiles, méthane…).

La pression partielle des gaz est utilisée pour la définition des seuils d'exposition de l'organisme au-delà desquels apparaissent les effets toxiques des gaz.

3.2.4.1 Toxicité de l'oxygène

Généralités

L'oxygène est une molécule indispensable à la vie qui, suivant son niveau de concentration, peut devenir toxique pour toutes les cellules vivantes.

Si la PpO_2 devient trop faible, une crise hypoxique peut se déclarer et entrainer dans de brefs délais, une syncope hypoxique suivie d'une perte de connaissance.

A l'inverse, si la PpO_2 devient trop élevée, une hyperoxie toxique peut se déclarer. Le délai d'apparition des signes de toxicité va dépendre de 2 facteurs principaux : la pression partielle d'oxygène et le type de tissu considéré, puisque les tissus ne sont pas tous sensibles de la même manière vis à vis de la toxicité de l'oxygène. Il existe par ailleurs, une importante variabilité interindividuelle et inter-espèce face à ces mécanismes de toxicité. Chez l'homme « adulte », 2 organes sont touchés en premier : le cerveau (effet Paul Bert) et les poumons (effet Lorrain Smith).

L'hyperoxie augmente également le risque d'accident cardio-vasculaire chez les personnes atteintes de diabète, d'hypertension artérielle ou d'asthme d'où l'intérêt d'un suivi et d'une aptitude médicale (Al-Waili *et al.*, 2006).

Physiopathologie

La toxicité de l'oxygène s'exerce par l'intermédiaire des radicaux libres produits au cours de son métabolisme. Une partie de l'oxygène présent dans l'organisme n'entre pas dans les réactions d'oxydation et va pouvoir intégrer la voie des radicaux libres oxygénés. Ces derniers sont susceptibles de jouer un rôle favorable dans le cadre des défenses de l'organisme mais produits en excès, ils peuvent être à l'origine de pathologies.

La situation hyperoxique résulte de l'épuisement des mécanismes enzymatiques et non-enzymatiques de protection de l'organisme contre les radicaux libres (superoxyde dismutase, gluthation peroxydase, vitamine A, vitamine E, sélénium…) ou du fait que ces systèmes deviennent eux-mêmes la cible des radicaux libres de l'oxygène. A l'heure actuelle, si ces mécanismes sont de mieux en mieux compris, il n'est pas possible de prédire leur apparition de manière précise et fiable.

Toxicité neurologique

La toxicité de l'oxygène sur le système nerveux central résulte d'une exposition aigüe à une PpO_2 élevée. Il s'agit de l' « effet Paul Bert » caractérisé par l'apparition de signes neurologiques pouvant aller jusqu'à la crise convulsive de type « épileptique ».

Des signes avant-coureurs de la crise hyperoxique ou prodromes peuvent se manifester, tels une tachycardie, des troubles du comportement, une anxiété, des hallucinations visuelles ou auditives, des nausées ou vertiges, *etc*, mais ils sont très variables et peu spécifiques.

La crise se déroule classiquement suivant trois phases : une phase tonique (30 secondes environ) caractérisée par un raidissement musculaire généralisé avec blocage respiratoire ; une phase clonique (2 à 3 minutes environ) au cours de laquelle le patient va convulser avec simultanément morsure de la langue et émission d'urines ; une phase de coma post-critique (10 à 15 minutes environ) caractérisée par une perte de connaissance suivie d'un retour progressif à la conscience, dans un état confus parfois agité.

Une fois la crise déclenchée, il n'est pas possible de l'arrêter, même si le mélange respiré n'est plus hyperoxique. Sous réserve d'un retour à la normale de la PpO_2 respirée, la crise hyperoxique ne laisse aucune séquelle, mais lorsqu'elle survient dans l'eau, elle expose le travailleur aux risques de noyade, de surpression pulmonaire et d'accidents de décompression. Si l'inhalation d'oxygène hyperoxique se poursuit, les crises se succèdent jusqu'à causer le décès du patient.

La sensibilité individuelle et d'autres facteurs tels la fatigue, l'effort physique, l'hypercapnie, le froid ou encore l'immersion, favorisent l'apparition de ces effets toxiques. La crise se déclenchera d'autant plus rapidement que la pression partielle d'oxygène sera élevée.

Toxicité pulmonaire

Comparativement à la toxicité nerveuse, la toxicité pulmonaire de l'oxygène résulte d'une exposition prolongée à une PpO_2 plus faible. Cette intoxication pulmonaire appelée « effet Lorrain-Smith », se caractérise par une inflammation des alvéoles pulmonaires sous l'action de l'oxygène hyperbare.

L'apparition des effets toxiques pulmonaires de l'oxygène dépend la PpO_2 et de la durée d'exposition. Pour une exposition à une PpO_2 inférieure à 0,5 bar, aucune manifestation clinique de toxicité pulmonaire n'apparait chez l'homme, quelle que soit la durée d'exposition. Les premiers signes sont visibles pour une PpO_2 supérieure à 0,5 bar et respirée pendant une durée supérieure à deux heures. La gravité des effets croît ensuite avec la durée d'exposition suivant le Tableau 8 décrit ci-dessous.

Tableau 8 : Signes cliniques de la toxicité pulmonaire de l'oxygène en fonction de la durée d'exposition et pour une exposition de volontaires sains humains à des PpO_2 supérieures à 0,5 bar (Broussolle *et al*., 2006)

Durée d'exposition	Symptômes
De 2 heures à 6 heures	Douleur rétro-sternale, irritation trachéale
De 6 heures à 8 heures	Apparition de la toux
De 8 heures à 10 heures	Apparition des manifestations graves : - dyspnée avec toux paroxystique - hyperthermie - râles disséminés, prédominant dans les lobes inférieurs - atélectasies (affaissement des alvéoles pulmonaires)

Le risque hyperoxique pulmonaire concerne principalement les travailleurs hyperbares intervenant à saturation qui séjournent de façon prolongée en ambiance suroxygénée (PpO_2 supérieure à 0,5 bar). Néanmoins, lorsque des lésions pulmonaires apparaissent, elles sont transitoires et la récupération des travailleurs est complète.

3.2.4.2 Toxicité du gaz carbonique (CO_2)

Présent naturellement dans l'air inspiré à un taux variant de 0,03 à 0,06 % environ, le CO_2 est nécessaire aux grandes régulations de l'organisme et ne présente pas de toxicité propre. Il est également synthétisé par l'organisme *via* la respiration cellulaire ; c'est le CO_2 endogène.

Son élimination de l'organisme dépend de la ventilation alvéolaire. Lorsque le CO_2 est présent en excès dans le sang ($PpCO_2$ supérieure à 45 mmHg), on parle d'hypercapnie.

Au cours d'une intervention hyperbare, la pression partielle du CO_2 inspiré augmente sous l'effet de la pression conduisant à une hypercapnie. Dans ces conditions, le CO_2 en excès dans le sang peut provenir de deux sources :

- le CO_2 endogène : en milieu hyperbare, la production endogène du CO_2 est accrue *via* l'augmentation du métabolisme cellulaire en lien avec l'effort physique fourni, le froid environnant…
- le CO_2 exogène : *via* une introduction accidentelle (local mal ventilé, prise d'aspiration de compresseur situé trop près d'une source de pollution) dans le mélange gazeux respiratoire.

Les symptômes de l'hypercapnie sont de gravité croissante avec l'augmentation de la pression partielle de CO_2 suivant le Tableau 9 ci-dessous.

Tableau 9 : Signes cliniques de l'hypercapnie en fonction de la PpCO_2 (décrits pour une plongée à l'air avec exercice physique modéré) (Broussolle *et al*., 2006)

Pression partielle de CO_2 (hPa ou bar)	Symptômes
Jusqu'à 10 hPa soit 0,01 bar	Aucun effet significatif
A 20 hPa soit 0,02 bar	Hyperventilation légère, augmentation de la fréquence respiratoire
A 40 hPa soit 0,04 bar	Essoufflement net, céphalées
A 60 hPa soit 0,06 bar	Essoufflement incontrôlable, apnée volontaire impossible, céphalées, désorientation spatiale
A 70 hPa soit 0,07 bar	Tachypnée incontrôlable, céphalées violentes, congestion du visage, sueurs, vertiges, vomissements, excitation, état avancé de narcose avec sensation d'ébriété pouvant aller jusqu'à la perte de connaissance

En réponse à l'augmentation de la PpCO_2, l'hypercapnie entraine en premier lieu une hyperventilation réflexe, suivie d'un essoufflement pouvant dans les cas d'intoxication les plus graves, aller jusqu'à un état narcotique sévère et conduire à la perte de connaissance.

Par ailleurs, l'hypercapnie est un facteur favorisant l'action toxique de l'oxygène, le pouvoir narcotique de l'azote et la survenue des accidents de désaturation en potentialisant la formation et la croissance des bulles.

Il est à noter que les travailleurs entrainés semblent avoir acquis une hyposensibilité ventilatoire au CO_2 (effet chronique) ; celle-ci se manifeste par une réponse ventilatoire affaiblie à l'hypercapnie.

3.2.4.3 Toxicité des gaz inertes

Narcose aux gaz inertes

Les pressions partielles élevées des gaz inertes (azote, hélium, néon, hydrogène…) dans le mélange gazeux respiratoire inhalé peuvent être à l'origine d'effets narcotiques sur l'organisme, variables suivant le gaz considéré. Pour chaque gaz et suivant chaque individu, il existe un seuil d'exposition au-delà duquel les symptômes de la narcose apparaissent et vont en s'aggravant avec l'augmentation de la pression.

Les gaz dits « inertes » ne sont pas métabolisés par l'organisme et ne vont donc pas interagir en modifiant la chimie cellulaire. Ils auraient *a priori* un simple effet mécanique. La physiopathologie est encore mal connue, mais 2 hypothèses ont été émises et toutes deux résultent en une modification de la perméabilité de la membrane cellulaire à certains composants. Selon l'hypothèse lipidique, les gaz diffuseraient dans la double couche de lipides constituant la membrane cellulaire et la distendraient ; selon l'hypothèse protéique, les gaz interagiraient directement avec les protéines de la membrane cellulaire.

Compte tenu des gaz utilisés et des pratiques couvertes par le champ de la saisine, nous ne traiterons ici que la narcose à l'azote.

❖ ***Narcose à l'azote***

L'azote est un composant chimiquement neutre qui agit sur l'organisme en saturant les parties grasses des cellules nerveuses. L'azote dissous dans les tissus nerveux ralentit la transmission du signal électrique dans les neurones et va causer un ralentissement et une désorganisation de toute l'activité intellectuelle.

En application de la loi de Dalton, l'augmentation de la pression ambiante entraîne une augmentation de la pression partielle d'azote. Les travailleurs exposés à des pressions absolues d'air supérieures à 4 bars (profondeur équivalente de 30 mètres) peuvent développer les premiers signes d'une intoxication à l'azote connue aussi sous le nom d'ivresse des profondeurs. La narcose à l'azote se manifeste classiquement par des altérations du psychisme dont la sévérité est croissante avec l'augmentation de la pression : de la simple euphorie (4 bars) à la perte de connaissance (10 bars).

Les symptômes diffèrent et surviennent à des profondeurs variables suivant les individus. Toutefois, à 7 bars de pression absolue (profondeur équivalente de 60 mètres), tout le monde est narcosé. Les signes cliniques observés chez le sujet narcosé peuvent être, outre l'euphorie, une grande fatigue, un dialogue intérieur, des troubles de la vision (vision à effet tunnel) et de l'audition, une perte de la mémoire immédiate, une perte de la notion du temps, des difficultés de lecture des instruments, un essoufflement, une angoisse, une syncope… Le tableau clinique peut être d'apparition lente ou brutale, perçu ou non par le sujet. Les symptômes vont en s'aggravant avec l'augmentation de la pression et ils sont d'autant plus inquiétants que les conséquences peuvent être très graves : ADD, surpression pulmonaire et noyade. Après le retour à la pression normale, la narcose disparait et ne laisse aucune séquelle. Elle peut aussi, du fait de la désorganisation gestuelle être un facteur favorisant d'AT autres que les accidents hyperbares, tels que : blessures, plaies plus ou moins importantes, fractures, brulures, électrocution…

Certains facteurs sont connus pour favoriser l'apparition de la narcose à l'azote : le froid, la fatigue, l'obscurité, le stress, la consommation d'alcool, de tabac ou de drogues…

Avec l'expérience, il est possible de minimiser les effets de la narcose pour des plongées à l'air jusqu'à 6 bars de pression absolue, si les conditions environnementales sont favorables. La prévention nécessite de respecter les limites de profondeur propres au mélange gazeux respiratoire utilisé mais aussi en fonction de l'entraînement du travailleur et son état de fatigue.

Toxicité de l'hélium

L'exposition longue durée à une pression partielle élevée d'He est responsable du syndrome nerveux des hautes pressions (SNHP). Il est caractérisé par un ensemble de troubles d'origine nerveuse regroupés en signes cliniques, comportementaux ou neurologiques (tremblements, secousses musculaires, hallucinations auditives, baisse du niveau de vigilance, diminution des performances psychométriques, nausées, vertiges…) et en signes électro-physiologiques (modifications électro-encéphalographiques, signes d'une souffrance cérébrale avec modification des réflexes, perturbation du sommeil…). Le SNHP ne concerne que les interventions très profondes (travailleurs hyperbares de la Classe III) à saturation, non couvertes par le champ de la saisine.

Outre le SNHP, une publication rapporte l'absence d'effet de l'hélium sur les fonctions endocriniennes (Popova *et al.*, 2008). Concernant la fonction cardiovasculaire, une autre publication décrit que l'effet des hautes pressions est contrebalancé par une PpHe élevée (Guerrero *et al.*,1997).

3.2.4.4 Contamination des mélanges respiratoires par des polluants

L'introduction accidentelle de polluants lors de la fabrication d'un mélange gazeux respiratoire est possible.

Dans le cas des plongées à l'air, plusieurs polluants préoccupants peuvent contaminer les mélanges : le CO_2 (évoqué précédemment) ; le monoxyde carbone (CO) ; les hydrocarbures lourds (huiles) et légers (gaz). La présence de ces composés est liée à une pollution de l'air de gonflage des bouteilles consécutive à une prise d'air effectuée dans un lieu contaminé. Les huiles peuvent provenir du compresseur lui-même, si le filtre est inefficace ou mal entretenu.

L'intoxication par le monoxyde de carbone est bien documentée. Incolore, inodore et insipide, le monoxyde de carbone provient de tout type de combustion incomplète (haut fourneau, moteur à explosions, gazinière mal réglée…). Le CO a 210 fois plus d'affinité que l'oxygène pour l'hémoglobine. En se combinant à cette dernière pour former la carboxyhémoglobine (HbCO), le CO empêche l'oxygène de se fixer sur l'hémoglobine, bloquant par conséquent l'oxygénation des tissus.

La toxicité dépend de la quantité de CO absorbé par l'organisme qui se traduit par le taux de HbCO dans le sang. Les manifestations toxiques commencent par des maux têtes, troubles de la vue, respiration difficile, bourdonnements, et vont jusqu'à une paralysie des jambes, une perte de connaissance brève (exposition à une concentration de CO de 1000 ppm pendant 2 h), un coma (exposition à une concentration de CO de 2000 ppm pendant 3 h) et la mort (exposition à une concentration de CO de 5000 ppm pendant 20 min).

Le traitement de ces intoxications consiste en une oxygénothérapie normo ou hyperbare à réaliser en urgence. Le Décret n°2011-45 du 11 janvier 2011 fixe à 5 Pa (soit 50 ppm pour une pression absolue de 1 bar) la valeur limite réglementaire pour la pression partielle de CO dans l'air ou les mélanges respirés au cours des interventions hyperbares.

Il est également possible que des poussières contaminent l'air à la sortie des compresseurs, c'est la raison pour laquelle ces derniers sont équipés de filtres à poussières.

Afin de respirer un mélange respiratoire de bonne qualité, il est important d'installer les prises d'air des compresseurs dans un endroit non pollué et bien ventilé.

Les enceintes hyperbares dans lesquelles s'effectuent les interventions à saturation peuvent également être contaminées par de nombreux polluants gazeux et particulaires (oxydes d'azote, dioxyde de soufre…). Le danger est lié d'une part aux pressions très élevées appliquées lors de ce type d'intervention, qui sont susceptibles d'augmenter suffisamment les pressions partielles de

certains contaminants pour dépasser leur seuil de toxicité ; d'autre part au volume de la chambre de saturation, à la durée en enceinte close, à la durée d'exposition des hyperbaristes concernés…

Pour prévenir ce type d'effets, des valeurs maximum admissibles dans les gaz et les mélanges sont définies pour les polluants les plus courants (VLEP fixées par le Code du travail, articles R. 4222-10, R. 4412-149 et R. 4412-150, transposées en pressions partielles).

3.2.5 L'accident cardio-vasculaire d'immersion

Parallèlement à une exposition aux risques précédemment décrits (accidents barotraumatiques et ADD), la pratique d'une activité hyperbare en milieu immergé peut être à l'origine d'accidents consécutifs aux contraintes liées à l'immersion ; les accidents cardio-vasculaires d'immersion. Il s'agit le plus souvent d'un œdème aigu pulmonaire (OAP) d'immersion.

L'OAP d'immersion est un accident de plongée ayant un caractère multifactoriel, survenant au cours de la plongée scaphandre ou en apnée, la plupart du temps chez des sujets sans antécédents particuliers. Il peut néanmoins révéler une cardiopathie ou une hypertension artérielle sous-jacente.

L'hyperpression des capillaires pulmonaires induite par l'immersion peut entrainer des lésions de l'endothélium capillaire, puis de l'endothélium alvéolaire, mettant ainsi en relation directe la lumière capillaire et alvéolaire. Ces lésions sont responsables d'une défaillance mécanique alvéolo-capillaire, avec irruption du contenu des capillaires pulmonaires dans les alvéoles (présence de globules rouges dans le liquide alvéolaire). L'OAP peut également être causé par une défaillance de la pompe cardiaque.

Les premiers symptômes apparaissent pendant la plongée, au cours de la remontée ou rapidement dès le retour en surface. Il peut s'agir de toux, hémoptysie, dyspnée, asthénie, confusion ou encore oppression thoracique. Les symptômes disparaissent rapidement (5 min à 48h), de manière spontanée ou après instauration du traitement. Dans de rares cas, le décès est possible suite à un arrêt cardio-vasculaire.

Plusieurs facteurs favorisent son apparition : l'hyperpression hydrostatique liée à l'immersion, une combinaison trop serrée, un effort physique intense et également les résistances ventilatoires du détendeur. Une pathologie cardiaque méconnue ou mal contrôlée (hypertension artérielle traitée), est aussi un facteur favorisant. Elle pose de façon cruciale le problème de la non contre-indication médicale au travail en milieu hyperbare et du suivi spécifique de ces travailleurs.

Après l'accident initial, une période de repos et d'abstention d'activités hyperbares doit être observée, afin de permettre la guérison des lésions pulmonaires. En raison du risque de récidive, les OAP d'immersion peuvent constituer une contre-indication définitive à la pratique de la plongée.

3.3 Accidents par type de plongée, d'activité ou de matériel

3.3.1 Recherche bibliographique

L'analyse des effets sanitaires et de l'accidentologie liés à la pratique d'une activité professionnelle en conditions hyperbares s'appuie sur une revue de la littérature centrée sur les mélanges gazeux autres que l'air ainsi que les recycleurs et l'apnée. Les mots clés retenus concernaient la population exposée, les conditions d'exposition et les effets sanitaires. Ils sont présentés ci-dessous.

Population exposée

- #A : population exposée (généralités) (workers, occupational divers, professional divers, hyperbaric medicine, tunnel boring machine)
- #1 : Secteurs d'activité (Commercial diving, Offshore, Inland, onshore, HAZMAT, Nuclear, Diving instructors, Underwater tour guiding, Underwater archeology, Media diving, Underwater photography, Aquaculture, Aquarium diving, Military and naval diving, Police diving, Fishing, Search and rescue diving, Scientific diving, marine biology, oceanography, hydrology, geology, palaeontology, diving physiology, diving medicine, Hyperbaric medicine, Tunnel boring machine)

Conditions d'exposition

- #B : conditions d'exposition (hyperbaric conditions, increased barometric pressure)
- #3 : Gaz et mélanges gazeux respiratoires (breathing gas, breathing mixture, compressed air with oxygen decompression, oxygen, nitrogen, helium, heliox, trimix, nitrox, heliair)
- #4 : Techniques (scuba diving, self-contained underwater breathing apparatus, open circuit, scuba, diving regulator, aqualung, closed circuit, rebreather, Dolphin, Ray, Draeger, semi closed circuit : Inspiration, Evolution, Ambient Pressure Diving, free diving, breath hold diving, apnea)

Effets sanitaires

- #C : effets sanitaires généraux (health effects, hazards, risks)
- #2 : Effets sanitaires détaillés (health effects, hazards, risks, disease, pathology, diving disorders, Barotrauma, Pulmonary, Ear and sinuses, Digestive tract, Colon diver, Dental, Face, Biochemical accident, Neurotoxicity, hyperoxia, seizure, oxidative stress, oxygen toxicity, Pulmonary Toxicity , Narcosis, nitrogen narcosis, inert gas narcosis, raptures of the deep, Martini effect, High Pressure Nervous Syndrome, HPNS, Decompression sickness, patent foramen ovale, right-to-left shunt, decompression illness, divers' disease, the bends disease, the caisson disease, Dysbaric osteonecrosis, aseptic necrosis of bone, Cardiovascular disorders, cardiac alteration, immersion pulmonary oedema, Long term effetcs of diving, Drowning, Hypothermia, Death)

Plusieurs requêtes croisées ont été réalisées afin d'avoir une vision exhaustive et large des publications couvrant la thématique. Les bases de données explorées incluent Scopus et Pubmed. Le Tableau 10 suivant présente synthétiquement le résultat de cette recherche.

Tableau 10 : Résultats des recherches bibliographiques larges croisées par grandes thématiques

RECHERCHES ABC		SCOPUS	PUBMED
		Total	Total
A*B	Population (#A)*Conditions d'exposition (#B)	ALL : 297	ALL : 50
A*B*1	Population (#A)*Conditions d'exposition (#B)*Secteurs d'activité (#1)	ALL : 229	
A*B*2	Population (#A)*Conditions d'exposition (#B)*Effets sanitaires détaillés (#2)	ALL : 240	
A*B*3	Population (#A)*Conditions d'exposition (#B)*Gaz et mélanges gazeux respiratoires (#3)	ALL : 231	
A*B*4	Population (#A)*Conditions d'exposition (#B)*Techniques et équipements (#4)	ALL : 201	
B*C	Conditions d'exposition (#B)*Effets sanitaires généraux (#C)	ALL : 152	ALL : 3
B*C*1	Conditions d'exposition (#B)*Effets sanitaires (#C)*Secteurs d'activité (#1)	ALL : 98	
B*C*3	Conditions d'exposition (#B)*Effets sanitaires (#C)*Gaz et mélanges gazeux respiratoires (#3)	ALL : 117	
B*C*4	Conditions d'exposition (#B)*Effets sanitaires (#C)*Techniques et équipements (#4)	ALL : 110	
A*C	Population (#A)*Effets sanitaires généraux (#C)	ALL : 208165	ALL : 9395
A*C*1	Population (#A)*Effets sanitaires généraux (#C)*Secteurs d'activité (#1)	ALL : 20890	
A*C*3	Population (#A)*Effets sanitaires généraux (#C)*Gaz et mélanges gazeux respiratoires (#3)	ALL : 12398	
A*C*4	Population (#A)*Effets sanitaires généraux (#C)*Techniques et équipements (#4)	ALL : 51595	
A*B*C	Population (#A)*Conditions d'exposition (#B)*Effets sanitaires généraux (#C)	ALL : 99	ALL : 0
	Total sans les doublons	349	4
	Total SCOPUS + PUBMED	353	

a) Dans le cadre du lancement d'une requête sur les banques de données bibliographique, « * » signifie « ET »

b) A l'intérieur de chaque groupe (#A, #B, #C, #1, #2, #3 et #4), l'ensemble des mots clés retenus ont été utilisés pour lancer chaque requête, en les associant par le terme « OU ».

Plusieurs requêtes croisant la population concernée (#A) et les effets sanitaires généraux (#C) recouvraient entre 9395 et 208165 références. Ces requêtes ont été jugées peu restrictives et inappropriées et par conséquent, n'ont pas été incluses pour cette expertise.

Au final, 353 références ont été identifiées avec ces requêtes larges. Les titres et les résumés de ces publications ont ensuite été lus afin de réaliser un premier tri en considérant comme filtre la mention à des effets sanitaires en lien avec des mélanges gazeux autres que l'air en conditions hyperbares, les recycleurs ou l'apnée. De nombreuses références ont été exclues pour les raisons suivantes :

- Le contenu et les objectifs ne correspondaient pas à l'expertise (bénéfice thérapeutique de l'oxygénothérapie en lien avec le diabète, la cicatrisation lors d'actes chirurgicaux ou des cancers ; hypobarie ; anesthésie ; tests de matériels utilisés dans les caissons ; effets sanitaires liés à la prise de certains médicaments par les plongeurs en conditions hyperbares ; tables de décompression à l'air ; exposition sonore des plongeurs professionnels, *etc*) ;
- Les publications étaient rédigées dans une autre langue que l'anglais et le français (allemand, russe, japonais, *etc*).

A ce stade, 58 articles ont été retenus pour analyse approfondie impliquant une lecture de l'article. Les références de ces articles sont listées en Annexe 3 et font l'objet d'une description ainsi qu'une évaluation quant à leur pertinence pour répondre à cette expertise.

La revue des articles apporte plusieurs enseignements. Plusieurs articles apportent un éclairage intéressant mais non spécifique aux problématiques de l'expertise et concernent plutôt les effets sanitaires liés aux conditions hyperbares (Cooper *et al.*, 2009 ; De Gorodo *et al.*, 2003 ; Doolette *et al.*, 2011 ; Francis *et al.*, 2002 ; Vann *et al.*, 2011 ; Liepmann *et al.*, 1981 ; Polkinghorne *et al.*, 1988 ; Estropova *et al.*, 1978 ; Lillo *et al.*, 1997 ; De Mojà *et al.*, 1987 : Rostain et Balon, 2006). D'autres publications concernent les effets sanitaires, certes parfois en lien avec des mélanges gazeux autres que l'air, consécutifs à des plongées profondes à saturation et investiguent plutôt le syndrome nerveux des hautes pressions (SNHP) (Reinersten *et al.* 1998 ; Avinar *et al.*, 2010 ; Kurita *et al.*, 2002 ; Mor et Grossman, 2006 ; Mor et Grossman, 2010 ; Mor *et al.*, 2012 ; Mor *et al.*, 2008 ; Weibing *et al.*, 1998 ; Naidina *et al.*, 2009 ; Chen *et al.*, 2012 ; Aitken *et al.*, 2000 ; Seki et Hugon, 1977 ; Flook, 2008). Ces articles ne correspondent pas au périmètre de l'expertise

excluant les plongées à saturation. Aucune référence sur l'accidentologie et les effets aigus ou chroniques en lien avec la pratique de l'apnée dans un contexte professionnel n'a été recensée. Le constat est similaire pour l'usage des recycleurs dans un contexte professionnel. Concernant les mélanges gazeux autres que l'air, de nombreuses publications étudient les effets sanitaires liés à la respiration d'oxygène pur en conditions hyperbares, principalement pour la décompression ou le traitement médical (Lin *et al.*, 2011 ; Vucetic *et al.*, 2004 ; Lund *et al.*, 2005 ; Al-Waili *et al.*, 2006 ; Peachey *et al.*, 2010 ; Ratzenhofer-Komenda *et al.*, 1998 ; Stirban *et al.*, 2009 ; Sato *et al.*, 2001 ; Vera Cruz *et al.*, 2009 ; Calvert *et al.*, 2007 ; Cevik *et al.*, 2013 ; Li *et al.*, 2011 ; Sonn *et al.*, 2008 ; Lund *et al.*, 1999 ; Tikkinen *et al.*, 2011 ; Biersner *et al.*, 1976).

La rédaction des effets sanitaires liés à la pratique d'une activité professionnelle en conditions hyperbares centrée sur les mélanges gazeux autres que l'air, l'apnée et les recycleurs s'appuie directement sur les publications issues de cette revue bibliographique et jugées pertinentes mais recoupe aussi principalement les ouvrages de référence sur les principes théoriques relatifs aux effets des gaz et les données d'accidentologie recueillies lors des auditions.

3.3.2 Accidents liés aux mélanges gazeux respiratoires en circuit-ouvert et en recycleur

En dehors des ADD et des accidents barotraumatiques dont la survenue est en générale indépendante du type d'appareil respiratoire utilisé (Coulange *et al.*, 2009), il existe d'autres accidents de plongée liés directement à l'emploi des mélanges et des recycleurs.

Ces accidents sont pour la plupart des accidents biochimiques (appelés aussi accidents toxiques), liés le plus souvent à une erreur de mélange, à un défaut de fonctionnement du recycleur ou à un non-respect des consignes d'utilisation de l'appareil d'intervention par le plongeur.

Le risque le plus important des accidents biochimiques reste la perte de connaissance qui, en milieu aquatique, peut en l'absence de précautions spécifiques engendrer la noyade, dont l'issue est presque toujours fatale.

Les différents types d'accidents biochimiques suivants seront passés en revue dans ce chapitre :

- L'hypoxie (aigüe et progressive) ;
- L'hyperoxie (aigüe et chronique) ;
- L'hypercapnie (aigüe et progressive).

Les accidents cardio-vasculaires d'immersion, pouvant être favorisés par l'emploi du recycleur, seront également abordés.

3.3.2.1 Les accidents barotraumatiques

Dans le cadre des interventions hyperbares en immersion, le barotraumatisme survient principalement chez le plongeur débutant, le plus souvent à proximité de la surface où la variation de pression est la plus importante (Le Guen *et al.*, 2012).

Barotraumatisme de l'oreille

En immersion, le barotraumatisme de l'oreille moyenne est rapporté dans 1 à 2% des plongées et généralement peu grave ; il s'agit de la lésion la plus classique du plongeur débutant. Il est secondaire à une non maîtrise de la vitesse de compression ou à une manœuvre de Valsalva intempestive lors de la décompression ; en application de la loi de Mariotte, il s'avère qu'en immersion, les variations de pression sont les plus importantes près de la surface, expliquant que ces effets touchent plus fréquemment les plongeurs en apnée et les plongeurs autonomes qui descendent trop rapidement.

Il peut être facilité par une dysperméabilité tubaire transitoire consécutive à un épisode infectieux de la sphère ORL. L'hyperoxie peut également modifier la perméabilité tubaire.

La mise sous pression est strictement contre-indiquée tant que les lésions tympaniques ne se sont pas résorbées et que la mobilité du tympan à la manœuvre de Valsalva n'est pas normalisée.

Le travailleur menant une activité hyperbare doit effectuer des manœuvres d'équilibration afin d'éviter un barotraumatisme de l'oreille moyenne (Renon *et al.*, 2006).

Les barotraumatismes de l'oreille interne sont quant à eux beaucoup moins fréquents (10 fois moins) que les barotraumatismes de l'oreille moyenne ; ils peuvent néanmoins avoir pour les travailleurs des conséquences non seulement sanitaires (oreille interne fragilisée, diminution voire perte des capacités auditives), mais également professionnelles de par la nécessité potentielle d'un reclassement.

Les moniteurs de plongée et les chasseurs sous-marins sont plus particulièrement touchés en lien avec les nombreux allers et retours entre la surface et le fond qu'ils sont amenés à faire de par leur activité et par une vitesse de compression souvent rapide.

Barotraumatisme sinusien

Les barotraumatismes sinusiens surviennent dès le début d'une mise sous pression et en immersion, ils empêchent la descente du plongeur. Ils peuvent également apparaître lors de la phase de décompression et ainsi gêner en plongée le retour vers la surface.

Ce sont des accidents rares ; les barotraumatismes sinusiens sont 3 moins fréquents que les barotraumatismes de l'oreille moyenne. Ils sont facilités par des épisodes infectieux ou allergiques de la sphère ORL.

L'évolution est le plus souvent spontanément favorable en quelques jours. Un hématome surinfecté peut apparaître secondairement.

Si les barotraumatismes des sinus sont rares et occasionnent peu de séquelles, ils risquent de perturber le bon déroulement voire la sécurité d'une intervention et doivent faire l'objet d'une information précise auprès des travailleurs.

Barotraumatisme facial (placage de masque en plongée)

Le placage de masque est un accident rare. Les premiers signes apparaissent lors de la descente (vive douleur de la face, épistaxis et flou visuel) et la plongée est donc généralement interrompue.

La persistance d'un trouble visuel et/ou oculomoteur signe l'atteinte nerveuse ou musculaire et fait la gravité du tableau avec un risque de séquelle non négligeable.

Pour prévenir son apparition, il est nécessaire de souffler régulièrement par le nez, dans le masque, pendant la phase de compression.

Barotraumatisme dentaire

Cet accident est rarissime. Il débute lors des phases de compression ou de décompression par une douleur dont l'intensité croissante peut provoquer une syncope vagale. Dans de rares cas, la dent éclate et peut obstruer les voies aériennes. Il peut être également associé à un emphysème sous-cutané en cas de passage d'air en sous-cutané par l'intermédiaire d'une carie ou d'un kyste pulpaire.

La prévention de la majorité des barotraumatismes dentaires (à l'exception des odontalgies vasculaires) passe par un suivi médical rigoureux chez un dentiste.

Pneumencéphalie

Le travailleur évoluant en conditions hyperbares peut également être victime d'une pneumencéphalie (gaz dans les méninges) (Barthélémy *et al.*, 2004).

Barotraumatisme pulmonaire

En immersion, le barotraumatisme pulmonaire (Coulange *et al.*, 2009) représente moins de 5 % des accidents de plongée.

Survenant lors de la phase de décompression, il est caractérisé par une surpression pulmonaire (Barthélémy et Perrimond-Trouchet, 1962; Van Hulst *et al.*, 2003) avec hémorragie alvéolaire, pneumothorax (gaz dans la plèvre), pneumomédiastin (gaz dans le médiastin), emphysème sous-cutané (gaz sous la peau) et dans le cas le plus grave, embolie gazeuse coronarienne et/ou cérébrale (Moro *et al*,. 2011). Les premiers signes apparaissent dès la sortie de l'eau.

Cet accident est le plus souvent secondaire à un blocage respiratoire associé à une décompression rapide engendrée par un problème technique ou un accès de panique.

Il survient le plus souvent sur un poumon sain (absence d'asthme, absence d'emphysème ou de dystrophie bulleuse, absence d'antécédent de pneumothorax).

Contrairement aux idées reçues, il concerne tous types de plongeurs y compris le plongeur confirmé et l'encadrant. Dans 2 cas sur 3, le plongeur est en formation et effectue un exercice de remontée sans embout ou d'assistance avec échange d'embout (Coulange *et al.*, 2008). Il peut également survenir à de faibles profondeurs lors d'un baptême de plongée (Le Guen *et al.*, 2012).

Si l'évolution est le plus souvent spontanément favorable en quelques jours, dans les cas les plus graves, le barotraumatisme thoracique peut engendrer des séquelles neurologiques voire même engager le pronostic vital.

En scaphandre autonome, les conséquences de l'accident seront d'autant plus sévères :

- que le plongeur se trouvait près de la surface (le volume de gaz contenu dans les poumons double entre 10 mètres et la surface) ;
- qu'au moment du blocage expiratoire le plongeur avait les poumons remplis de gaz ;
- que la vitesse de remontée était trop rapide.

Barotraumatisme digestif

La survenue de troubles digestifs au cours d'une intervention hyperbare est rapportée avec un pourcentage non négligeable.

La plupart du temps, il s'agit de troubles bénins en rapport avec une distension des gaz contenus dans le tube digestif (colite du scaphandrier) lors de la phase de décompression. La prise d'un repas copieux peu de temps avant l'intervention et/ou la présence d'un ulcère gastrique en phase aiguë facilitent ce type d'événement.

Le barotraumatisme gastrique peut s'associer dans de rares cas à une rupture gastrique et/ou à un pneumopéritoine massif avec retentissement ventilatoire. D'après la littérature, la survenue de ce type de complications est associée à un ou plusieurs des facteurs suivants : des plongées profondes (plus de 40 mètres de profondeur), une remontée rapide consécutive à un accès de panique ou un problème technique et une déglutition accidentelle d'eau.

Les barotraumatismes peuvent être prévenus par le contrôle des vitesses de compression et de décompression, la réalisation d'une visite médicale bien conduite à la recherche d'une pathologie sous-jacente pouvant fragiliser un organe creux (maladie bullaire pulmonaire, ulcère gastrique…) ou l'inaptitude temporaire en cas de pathologie intercurrente gênant l'équipression des cavités aériques de l'organisme (dysperméabilité tubaire consécutive à une rhynopharyngite, sinusite…).

3.3.2.2 Les accidents de désaturation

En cas de non-respect des procédures de décompression et/ou de facteurs favorisants individuels et environnementaux, il peut arriver que les gaz neutres dissous reprennent leur forme gazeuse directement au sein des tissus ou des vaisseaux. Cet afflux massif de bulles peut être responsable d'un ralentissement circulatoire dans les plexus veineux épiduraux aboutissant à un infarcissement médullaire (ADD médullaire). Les bulles de gaz peuvent également emboliser la circulation pulmonaire, réduisant les échanges alvéolocapillaires et entraîner un accident cardio-vasculairelésionnel (ADD pulmonaire ou "chokes") (Blatteau *et al*., 2006). Parfois, elles passent sur le versant artériel par forçage du filtre pulmonaire (Butler et Katz, 1988) avec ouverture de shunts intrapulmonaires ou par perméabilisation d'un foramen ovale (Germonpre *et al.*, 1998) pour aller se bloquer dans l'une des branches de l'artère cochléo-vestibulaire (ADD vestibulaire) ou dans la circulation cérébrale (ADD cérébral). Au niveau de ces différentes localisations, le manchon gazeux interagit avec la paroi vasculaire entraînant une cascade de réactions inflammatoires (Philp 1974) responsable d'une hypercoagulation et d'une altération de la perméabilité vasculaire appelée "maladie de désaturation" (Méliet 2006).

Des bulles extravasculaires non circulantes ont également été observées lors de la désaturation. Elles peuvent comprimer les terminaisons nerveuses proprioceptives de la peau

(ADD cutané), distendre les capsules articulaires des grosses articulations (ADD ostéo-arthromusculaire ou "bends") (Coulange *et al*., 2006) ou détruire les structures sensorielles de l'oreille interne (ADD vestibulaire).

Les premiers signes de l'ADD apparaissent généralement dans les 24 heures qui suivent l'intervention en milieu hyperbare. Dans le cas d'une intervention de longue durée aux mélanges et/ou au recycleur, les signes peuvent débuter lors des paliers. Ils sont le plus souvent secondaires à une atteinte osseuse ou vestibulaire.

Les principales mesures préventives sont le respect des procédures de décompression, la limitation des durées fonds en cas de plongées profondes, le contrôle du froid, la limitation des efforts immergés, la maîtrise des vitesses de décompression et de la flottabilité, l'utilisation de mélanges suroxygénés, l'hydratation post intervention et l'absence d'effort dans les heures qui suivent. Une reprise progressive est également indispensable en cas d'arrêt prolongé.

3.3.2.3 Les accidents biochimiques

<u>Hypoxie</u>

La chute de la pression partielle d'oxygène (fraction d'oxygène contenu dans le mélange multipliée par la pression absolue) en dessous de 110 à 130 hPa selon la sensibilité individuelle peut entraîner rapidement une syncope hypoxique avec perte de connaissance.

Elle peut être consécutive à une erreur technique ou dans le cas de l'utilisation d'un recycleur, à un dysfonctionnement de l'appareil.

❖ ***Hypoxie aigüe***

L'hypoxie aigüe est une hypoxie brutale, sans aucun signe avant-coureur, pour laquelle le travailleur en milieu hyperbare n'a pas le temps de mettre en place d'actions correctrices (changement de mélange en circuit ouvert, injection d'oxygène ou passage sur le circuit de secours en recycleur).

Ce type d'accident peut survenir lorsque le mélange se rapproche rapidement du seuil hypoxique et/ou que le travailleur est dans sa phase de décompression (remontée vers la surface dans le cas d'un plongeur) : l'association d'un mélange s'appauvrissant en pourcentage d'oxygène et d'une baisse régulière de la pression relative va aboutir rapidement au seuil hypoxique, et donc à la syncope brutale.

Cet accident survient surtout en recycleur à cause :

- d'une erreur de mélange ;
- d'un mauvais calibrage des sondes à oxygène ;
- d'un mauvais montage et à l'absence d'essais de vérification ;
- de l'utilisation d'un mélange non approprié ;
- d'un dérèglement de l'appareil pendant la plongée.

❖ ***Hypoxie progressive***

L'hypoxie progressive est une hypoxie qui s'installe lentement et pour laquelle le plongeur peut ressentir des prodromes (manifestations cliniques) auxquels il doit être attentif.

Cet accident survient lorsque le mélange s'appauvrit progressivement en oxygène, avec une pression partielle d'oxygène qui se situe entre 170 et 120 hPa pendant une période suffisamment longue (quelques minutes) pour déclencher dans l'ordre les signes suivants :

- une augmentation de l'amplitude respiratoire à type de dyspnée, de soif d'air ;
- une sensation de bien-être et de confiance en soi ;
- une difficulté d'accommodation ;

- des "vertiges", de la confusion mentale ;
- puis vers une PpO_2 de 120 hPa (soit 0,12 bar ou 0,12 ATA), seuil de l'hypoxie aiguë, le sujet devient inerte. Il présente parfois quelques mouvements spasmodiques non systématisés des jambes et des bras.

Selon les différents types de recycleurs utilisés, cette hypoxie progressive peut survenir dans les circonstances suivantes :

- *Avec les appareils à recyclage partiel des gaz*
  - Si la valeur de la fuite est insuffisante ou à plus forte raison nulle et que la composition du mélange inhalé devient trop pauvre en oxygène (dysfonctionnement de l'injecteur d'appoint pendant la décompression).

- *Avec les appareils à recyclage complet des gaz*
  - Si la composition du mélange inhalé devient trop faible en oxygène par dysfonctionnement des sondes à oxygène ou de l'ordinateur pilotant l'admission d'oxygène.

- *Avec les appareils à recyclage complet d'oxygène pur*
  - Si le cycle de rinçage n'est pas ou mal effectué. Ce cycle a pour but d'éliminer l'air contenu au départ dans tout le circuit (bronches, poumons de l'utilisateur et sac ventilatoire de l'appareil) et permettre d'avoir quasiment que de l'oxygène pur dans l'ensemble de la boucle ventilatoire ;

  - Si l'oxygène contenu dans la bouteille n'est pas pur (titre de pureté < 99 %). Dans ce cas, au fur et à mesure de la consommation d'oxygène, la petite fraction de gaz (azote le plus souvent) peut remplacer progressivement cet oxygène et aboutir à un mélange hypoxique.

Hyperoxie

L'accident hyperoxique est consécutif à l'inhalation prolongée d'oxygène pur ou d'un mélange suroxygéné (type Nitrox) contenant de l'oxygène à une pression ambiante permettant d'atteindre une PpO_2 supérieure à 500 hPa (soit 0,5 bar ou 0,5 ATA) (Courtière 2006).

Il est parfois possible de rechercher un effet thérapeutique à l'inhalation d'oxygène sous pression, comme en OHB ; des études ont montré qu'en conditions hyperoxiques, l'augmentation de l'oxygène dissous contrebalance l'effet vasoconstrictif de l'oxygène entrainant un maintien voire un accroissement de l'oxygénation tissulaire (Ratzenhofer-Komenda *et al.*, 1998 ; Stirban *et al.*, 2009). Une publication semble par ailleurs indiquer l'absence d'effet de l'hyperoxie sur la concentration d'hormones de stress (Lund *et al.*, 1999).

Il existe néanmoins un risque d'observer les effets toxiques de l'oxygène. Ceux-ci peuvent être aigus (toxicité neurologique ou effet Paul Bert) ou chroniques (toxicité pulmonaire ou effet "Lorrain-Smith") (Capellier *et al.*, 1997 ; Fildissis *et al.*, 2004 ; Li *et al.*, 2011 ; Sato *et al.*, 1997, Narozny *et al.*, 2002 ; Constantidinidis *et al.*, 2000 ; Pacini *et al.*, 2003 ; Vera-Cruz *et al.*, 2009 ; Sonn *et al.*, 2008).

L'effet toxique aigu retiendra plus particulièrement l'attention car il doit être bien connu du travailleur qui évolue en milieu hyperbare en utilisant des appareils à circuit fermé ou semi-fermé, mais également lors de la réalisation de paliers sous oxygène pur en circuit ouvert.

❖ ***Hyperoxie aigüe (ou crise hyperoxique)***

L'hyperoxie aiguë est caractérisée par une toxicité propre de l'oxygène sur le système nerveux central (Farmery et Sykes, 2012 ; Sato *et al.*, 2001) lorsque le travailleur va respirer de l'oxygène pur ou un mélange suroxygéné à une pression partielle d'oxygène en générale supérieure à 1600 hPa (soit 1,6 bar ou 1,6 ATA).

Cette neurotoxicité se traduit par un effet comparable à une crise épileptique, surtout dangereuse en immersion pour les risques de noyade, mais pouvant aussi induire un barotraumatisme pulmonaire et/ou un accident de désaturation en cas de remontée panique, voire un traumatisme surajouté.

Le délai d'apparition de la crise varie selon plusieurs facteurs :

- la sensibilité individuelle ;
- la pression partielle d'oxygène (PpO_2) ;
- les circonstances et la durée d'exposition ;
- l'hypercapnie.

Les signes précurseurs de la crise, très divers et inconstants, ne sont pas toujours spécifiques. En immersion, le plongeur ne sera pas en mesure de les relier à un risque hyperoxique ou n'aura pas le temps de réagir. Il s'agira principalement :

- d'une sensation de malaise général avec anxiété, angoisse, voire gêne respiratoire ;
- de crispation des muscles de la face (lèvres, paupières, *etc*.…) ;
- d'hallucinations visuelles (scotomes scintillants, lumières colorées) avec parfois un rétrécissement du champ visuel (vision en tunnel).

Cette hyperoxie aigüe peut donc survenir en circuit ouvert en cas de dépassement des pressions limites, mais surtout lors de l'utilisation de recycleurs dans les circonstances suivantes (Arieli *et al*., 2006) :

- *Avec les appareils à recyclage en circuit fermé d'oxygène pur*
  - Si le travailleur présente une sensibilité particulière à l'inhalation d'oxygène au-dessus d'une pression partielle de 1600 hPa (soit 1,6 bar ou 1,6 ATA) ;
  - Si le travailleur dépasse la pression partielle limite de 1600 hPa (soit une profondeur de 6 mètres en plongée) pendant un laps de temps conséquent (plusieurs minutes) ;
  - Si le travailleur effectue des efforts importants et/ou si la chaux sodée de l'appareil devient inefficace car alors la $PpCO_2$ peut monter rapidement.

- *Avec les appareils à recyclage partiel ou complet de gaz*
  - Lorsque la PpO_2 délivrée par l'appareil s'élève de façon anormale et dépasse le seuil de 1600 hPa (mauvais fonctionnement des cellules à oxygène, mauvais fonctionnement de l'ordinateur pilotant le mélange, ajout intempestif et non justifié d'oxygène par l'utilisateur) ;
  - Si l'utilisateur a mal préparé son appareil (mauvais choix du mélange « fond », mauvais choix de l'injecteur, mauvais réglage des buses) ;
  - Si le travailleur effectue des efforts importants et/ou si la chaux sodée de l'appareil devient inefficace.

Pour résumer, les accidents hyperoxiques aigus sont très souvent liés aux mêmes circonstances :

- ➢ Respiration d'oxygène pur à une pression partielle supérieure à 1600 hPa pendant un long laps de temps (quelques minutes) ;

- Efforts en cours d'intervention hyperbare favorisant l'hypercapnie ; celle-ci ayant des effets vasodilatateurs, elle va lever la vasoconstriction provoquée par l'inhalation d'oxygène à forte pression partielle. Le « lâchage » de cette vasoconstriction va aboutir à un afflux massif vers le cerveau d'oxygène dissous et combiné, provoquant la crise hyperoxique cérébrale.

La prévention de la crise hyperoxique va donc chercher à :

- Détecter au préalable la sensibilité individuelle grâce à une aptitude médicale plus rigoureuse avec recherche d'antécédents neurologiques, mais aussi par l'information du travailleur sur les dangers que représentent la fatigue générale, l'essoufflement, l'abus de vitamine C, de certains "dopants", ou même de médicaments qui peuvent augmenter le risque de survenue de l'hyperoxie aiguë ;

- Limiter la pression partielle d'oxygène inhalé (1600 hPa au maximum en immersion) ainsi que les durées d'exposition.

La réglementation encadrant les activités professionnelles hyperbares (Décret n°2011-45 du 11 janvier 2011) a défini sur des bases sanitaires et pratiques, des limites de pressions partielles d'oxygène ; lors de la phase de décompression notamment, pour les interventions hyperbares en immersion la PpO_2 doit être inférieure à 1 600 hPa (1,6 bar) ; pour les interventions hyperbares au sec, la PpO_2 ne doit pas dépasser 2200 hPa (soit 2,2 bars) pour une décompression d'une durée inférieure à 24 heures et 800 hPa soit 0,8 bar pour une décompression d'une durée supérieure à 24 heures.

Pour mémoire, des études de l'US Navy ont permis de déterminer les valeurs statistiques des durées de tolérance avant l'apparition d'une crise hyperoxique, pour un individu au repos, respirant de l'oxygène pur en caisson hyperbare au sec :

- 7 h pour une PpO_2 de 1700 hPa (soit 1,7 bar ou 1,7 ATA ou 7 mètres de profondeur) ;
- 3 h pour une PpO_2 de 1800 hPa (soit 1,8 bar ou 1,8 ATA ou 8 mètres de profondeur) ;
- 50 min pour une PpO_2 de 2000 hPa (soit 2 bars ou 2 ATA ou 10 mètres de profondeur) ;
- 30 min pour une PpO_2 de 3000 hPa (soit 3 bars ou 3 ATA ou 20 mètres de profondeur) ;
- 10 min pour une PpO_2 de 3500 hPa (soit 3,5 bar ou 3,5 ATA ou 25 mètres de profondeur).

❖ ***Hyperoxie chronique***

L'hyperoxie chronique concerne les travailleurs intervenant en conditions hyperbares pendant de longues durées (par exemple, les plongées profondes d'incursion avec longs paliers de décompression, les plongées en spéléologie).

Elle nécessite une PpO_2 au minimum supérieure à 500 hPa (soit 0,5 bar ou 0,5 ATA) et apparaît d'autant plus vite que la PpO_2 est élevée.

Le premier signe est en général une douleur rétro sternale (dans la poitrine), apparaissant à l'inspiration profonde. Si le travailleur reste soumis à une pression partielle d'oxygène supérieure à 500 hPa, cette douleur est suivie par une irritation pulmonaire au niveau alvéolaire (alvéolite) et trachéal, l'installation d'une dyspnée (difficultés ventilatoires) devenant rapidement invalidante ; voire le développement d'une trachéite inflammatoire avec toux persistante et une fièvre à 38°-39°C (Clark et Lambertsen, 1971 ; Lund *et al.*, 2005).

La prévention de cette pathologie passe par le respect des doses d'oxygène tolérées par l'organisme. Pour cela, il est possible de calculer le nombre d'unités de dose toxique pulmonaire (UPTD pour Unit of Pulmonary Toxic Dose) reçues par l'organisme ; 1 UPTD correspond à l'effet

pulmonaire théorique d'une pression partielle de 1 bar d'oxygène pur inspirée pendant 1 minute. La dénomination OTU (Oxygen Toxicity Unit) est également utilisée.

Le calcul de l'UPTD/OTU est utilisé afin de prévenir l'apparition des signes de toxicité pulmonaire au cours des interventions hyperbares professionnelles à saturation avec des mélanges suroxygénés ainsi que lors d'une exposition thérapeutique normobare ou hyperbare à l'oxygène. En pratique, une dose reçue de 600 UPTD entraine une baisse de capacité vitale de 2% chez 50% de la population exposée ; ce calcul n'a donc pas de valeur prédictive individuelle précise.

La dose d'oxygène reçue par minute (OTU) en fonction de la PpO_2 est calculée selon la formule ci-dessous :

$$\mathbf{OTU = \{ (PpO_2}\,\mathit{(bar)}\mathbf{- 0{,}5) / 0{,}5 \}^{0{,}83}}$$

A titre d'exemple, à 6 mètres de profondeur, la PpO_2 de l'oxygène pur est de 1,6 bar, la dose d'oxygène reçue par minute est donc de 1,92 OTU [$\left(\frac{1{,}6-0{,}5}{0{,}5}\right)^{0{,}83} = 1{,}92$].

La table OTU de Hamilton donne les valeurs de l'OTU par minute suivant la PpO_2 (cf Tableau 11 ci-dessous.

Tableau 11 : Table OTU de Hamilton (OTU par minute en fonction de la PpO_2) (Hamilton 1989)

PpO_2 (bar)	OTU/min
0.5	0
0.6	0.27
0.7	0.47
0.8	065
0.9	0.83
1	1
1.1	1.16
1.2	1.32
1.3	1.48
1.4	1.63
1.5	1.78
1.6	1.92

La méthode Repex (pour Repetitive Excursions Procedures Report) du « National Oceanic and Atmospheric Administration » (NOAA), qui définit les doses cumulées acceptables d'OTU quotidiennes, a été validée lors d'expériences américaines de maisons sous la mer dans les années 1970. Elle permet d'adopter un profil de décompression qui évite ou limite la symptomatologie respiratoire liée à la toxicité chronique de l'oxygène (Hamilton 1989).

Il est établi d'après la toxicité de l'oxygène que le nombre d'OTU sur 24 heures ne doit pas dépasser 1500. Compte tenu du fait qu'il est nécessaire d'envisager un traitement hyperbare pouvant aller jusqu'à l'assimilation de 650 OTU, par anticipation la dose maximum d'OTU pour une journée d'activités en conditions hyperbares ne doit pas dépasser 1500-650, soit 850 OTU.

Le Tableau 12 ci-dessous définit le maximum d'OTU autorisés par jour.

Tableau 12 : Table Repex (Hamilton 1989)

Nombre de jours consécutifs d'intervention en conditions hyperbares	**Dose maximale d'OTU autorisée par jour**	**Dose cumulée maximale d'OTU autorisée**	**Calcul de la dose maximum d'OTU restante par jour (à J_n)** (= dose cumulée maximale d'OTU autorisée à J_n - dose cumulée maximale d'OTU autorisée à J_{n-1})
1 (24h)	850	850	850 (= 1500 - 850)
2 (48h)	700	1400	550 (= 1400 - 850)
3 (72h)	620	1860	460 (= 1860 – 1400)
4 (96h)	525	2100	240 (= 2100 – 1860)
5 (120h)	460	2300	200 (= 2300 – 2100)

Le calcul des UPTD/OTU est utile en termes de prévention, mais n'a qu'une valeur indicative étant donné qu'il existe une très grande variabilité de la susceptibilité interindividuelle. Ces valeurs doivent être considérées comme des indices de suspicion de toxicité et non en tant que limites universelles de tolérance.

Hypercapnie

L'utilisation d'un recycleur peut aboutir plus qu'en circuit ouvert à une hypercapnie qui correspond à une accumulation d'une trop grande quantité de gaz carbonique (CO_2) dans le sang et dans les différents tissus de l'organisme.

En dehors de ses effets spécifiques que l'on passera en revue, l'hypercapnie représente également un facteur de risque pour les autres accidents survenant lors d'une exposition au milieu hyperbare, surtout l'hyperoxie aigüe les accidents de désaturation, mais aussi la narcose.

❖ ***Hypercapnie progressive***

Les causes de survenue d'une hypercapnie progressive (Badier 2006) sont de deux ordres :

➢ **Causes endogènes**

- *Production élevée de CO_2.*

La production de gaz carbonique (CO_2) par l'organisme est directement liée au niveau d'exercice musculaire de l'individu. En immersion, lors d'un effort mal contrôlé (lestage du plongeur trop important, cadence de palmage trop élevée, nage contre le courant...) à grande profondeur, l'hyperventilation peut aboutir à une production accrue de CO_2 par les muscles ventilatoires. Le froid et l'anxiété sont des facteurs favorisant la production de CO_2.

- *Ventilation inadaptée entraînant une rétention de CO_2.*

Lorsque la ventilation est inadaptée au niveau d'exercice du travailleur en milieu hyperbare, l'élimination du CO_2 produit par l'organisme est perturbée, provocant sa rétention en amont des poumons et une hypercapnie.

Cette inefficacité ventilatoire est favorisée par l'augmentation des résistances à l'écoulement du courant gazeux dans les voies respiratoires du travailleur et dans l'appareil d'intervention.

Ainsi différents facteurs peuvent favoriser l'hypercapnie d'origine endogène :

- augmentation de la densité du mélange gazeux avec la pression ;
- mauvaise ergonomie de l'appareil d'intervention (soupapes trop rigides, diamètre des tuyaux insuffisant, inertie du sac respiratoire...) ;
- débit gazeux insuffisant (hésitation à passer sur réserve, détendeur déficient, bouteilles vides).

➢ **Causes exogènes**

- *Pollution du mélange respiré*

Le mélange gazeux contenu dans les bouteilles de plongée peut être pollué lorsque, pendant le chargement des bouteilles, il existe un défaut de filtration.

- *Défaut d'épuration du mélange gazeux recyclé*

Dans les appareils à recyclage des gaz expirés, une épuration inefficace du CO_2 peut déclencher une hypercapnie :

- cartouche d'épuration mal conçue ou mal remplie ;
- chaux sodée de mauvaise qualité ou mouillée ou saturée.

La symptomatologie débute pour une $PpCO_2$ supérieure 10 hPa soit 0,01 bar ou 0,01 ATA et es signes cliniques de l'hypercapnie vont varier en fonction :

- de la tolérance individuelle ;
- de la teneur en CO_2 du mélange gazeux respiré ;
- de la profondeur d'évolution du travailleur, car la pression partielle du CO_2 dans un mélange respiré augmente avec la pression relative. Ainsi, un mélange contenant 1% de CO_2 respiré à 50 mètres aura le même effet qu'un mélange contenant 6% de CO_2 respiré en surface (la pression partielle de CO_2 est de 60 mbars dans les deux cas).

La prévention de l'hypercapnie progressive passe par la définition :

- D'un seuil de sécurité préconisé lors d'une intervention en milieu hyperbare, soit 10 hPa (1% dans un mélange en surface) ;
- D'une durée maximale d'utilisation de la chaux sodée définie en fonction de la quantité contenue dans le canister et de l'effort fourni en cours d'intervention : en moyenne, on considère qu'un kilogramme de chaux sodée permet de fixer 170 litres de gaz carbonique.

Le Décret n°2011-45 du 11 janvier 2011 fixe à 10 hPa la valeur limite réglementaire pour la pression partielle de CO_2 dans l'air ou les mélanges respirés au cours des interventions hyperbares.

La prévention repose également sur la modération des efforts physiques en milieu hyperbare, notamment lors des interventions à pressions élevées, un contrôle de sa ventilation, une vérification du bon fonctionnement des détendeurs et de la qualité des mélanges gazeux respiratoires utilisés.

❖ ***Hypercapnie aigüe***

Liée à l'utilisation d'un recycleur, l'hypercapnie aigüe survient brutalement, sans aucun signe avant-coureur, et provoque une perte de connaissance immédiate.

Elle est souvent causée par l'absence de chaux dans la cartouche et survient très rapidement après le début de l'intervention en conditions hyperbares (quelques secondes). Elle peut également survenir après un effort important alors que la chaux sodée commence à être saturée.

L'association de ces deux situations peut alors entraîner une perte de connaissance rapide sans que l'utilisateur n'ait pu appréhender la survenue d'une hypercapnie avec les signes habituels (céphalées, essoufflement,…).

3.3.2.4 L'accident cardio-vasculaire d'immersion

Chez le plongeur en circuit ouvert, l'augmentation de la pré-charge cardiaque secondaire à l'exposition à l'immersion, à la contention du néoprène et au froid est contrariée par les conditions de ventilation en charge (Wilmshurst *et al.*,1989).

Celle-ci, associée aux résistances ventilatoires statiques et dynamiques de l'appareil à recyclage de gaz (en plus du plongeur) accroissent les écarts de pression inspiratoires lorsque le sujet est en position de nage et que l'appareil se situe dans le dos du plongeur.

Si la distance entre le sac respiratoire du plongeur et le centre pneumoïque de ce dernier est trop importante, l'effort inspiratoire demandé peut s'ajouter aux autres contraintes subies par le plongeur.

De plus, lorsque la pression partielle en oxygène inspirée est élevée, le ralentissement cardiaque est marqué, les résistances vasculaires systémiques augmentées et la fonction du ventricule gauche peut être transitoirement altérée (Gole *et al.*, 2011; Al-Waili *et al.*, 2006). Il peut alors survenir un OAP d'immersion qui se traduit par une dyspnée en plongée, avec toux, essoufflement et crachats hémoptoïques.

D'où l'importance pour le plongeur d'avoir une fonction cardiaque mais également pulmonaire sans anomalie, ainsi qu'une bonne adaptation cardio-vasculaire à l'effort. Dans certains cas, l'intensité des contraintes environnementales peuvent suffire pour générer un OAP d'immersion chez un plongeur apparemment sain (Coulange *et al.*, 2010).

D'autre part, il est important que les détendeurs conservent leur performance en grande profondeur et que l'ensemble « appareil à recyclage de gaz / plongeur » présente des résistances inspiratoires et expiratoires conformes aux normes en vigueur. Or bien souvent, seuls les appareils sont testés par banc d'essais ; la position de l'appareil (et donc du faux poumon) par rapport au centre pneumoïque du plongeur revêt une importance fondamentale dans les conditions de survenue d'une telle pathologie.

La recherche d'une pathologie cardio-respiratoire sous-jacente, l'activité physique régulière, l'adaptation des contraintes environnementales à l'individu, l'entretien et la bonne utilisation du matériel sont des axes de préventions essentiels pour prévenir cette pathologie potentiellement mortelle (Henckes *et al.*, 2008).

3.3.3 Effets sanitaires liés à la pratique de l'apnée

3.3.3.1 La syncope

La syncope est l'une des causes les plus fréquentes d'accident grave en apnée. Elle survient généralement lors des derniers mètres ou en surface. Elle se traduit par une perte de conscience, le plus souvent sans signe annonciateur, et cède très rapidement après quelques stimulations. La reprise de la conscience se caractérise par une amnésie de l'épisode et une absence de séquelle. En l'absence d'assistance, la syncope peut se compliquer d'une noyade potentiellement mortelle.

La syncope est le plus souvent consécutive à une hypoxie sévère. En effet, lors d'une apnée, la ventilation est volontairement stoppée tandis que la respiration cellulaire continue à consommer de l'oxygène et à produire du dioxyde de carbone. Dans un premier temps, l'augmentation de

profondeur entraine une sensation de bien-être liée à l'élévation de la pression partielle en oxygène, puis le métabolisme entraîne une diminution de l'oxygène, d'autant plus marquée que l'apnée est associée à un effort en eau froide. Lors de la remontée, la chute de la pression hydrostatique favorise l'hypoxie, en particulier dans les derniers mètres. Dans des conditions normales, l'hypoxie s'associe à une augmentation du dioxyde de carbone appelée hypercapnie. L'hypercapnie provoque des contractions diaphragmatiques inconfortables qui incitent l'apnéiste à reprendre une ventilation avant que l'hypoxie ne soit trop sévère. En cas d'hyperventilation, l'hypercapnie est retardée et le risque de syncope hypoxique majoré (Corriol 2006b).

La syncope peut également être d'origine cardiogénique ou embolique lors d'une hyperpression intra-thoracique consécutive à une manœuvre de Valsalva (Diehl *et al.*, 2000) ou à une manœuvre de carpe (Dzamonja *et al.*, 2010). La carpe aussi appelée manœuvre glosso-pharyngienne consiste à forcer le remplissage pulmonaire en fin d'inspiration par des mouvements répétés de bascule arrière de la langue. L'hyperpression peut alors provoquer une chute du débit cardiaque par défaut de remplissage ou une embolie gazeuse systémique par rupture de la membrane alvéolo-capillaire (Lindholm et Nyren, 2005). Enfin, il a été récemment décrit des syncopes d'origine neuro-cardiogénique chez des sujets présentant une susceptibilité individuelle avec un niveau d'adénosine basal élevé (Joulia *et al.*, 2013).

L'hypoxie modérée peut engendrer des troubles moteurs pendant quelques secondes avec un état de conscience apparemment conservé, appelé « Samba ».

La syncope et la samba peuvent être prévenues par une limitation de l'hyperventilation, une réduction des durées d'apnée, en particulier pour des profondeurs de plus de 10 mètres, un échauffement systématique et une manœuvre de carpe maîtrisée en cas de grandes profondeurs. Au cours d'une plongée, la surveillance permanente par un deuxième apnéiste, capable de descendre à la même profondeur, permet d'éviter la noyade en cas de syncope.

3.3.3.2 L'accident cardio-vasculaire d'immersion

L'immersion à neutralité thermique (34°C) provoque une contention hydrostatique des tissus mous qui engendre une ascension diaphragmatique, une redistribution d'environ 700 mL de sang vers la cage thoracique plus rigide et une augmentation de pression dans les cavités cardiaques droites (Risch *et al.*, 1978 ; Gabrielsen *et al.*, 1993). La position allongée amplifie la congestion pulmonaire en facilitant le retour veineux (Lange *et al.*, 1974). La capacité vitale est ainsi réduite, le volume expiratoire de réserve décroît d'environ 30% et l'espace mort augmente (Craig et Dvorak, 1975). La compliance parenchymateuse pulmonaire est également diminuée par la compression hydrostatique thoracique et la présence d'une combinaison (Dahlback *et al.*, 1978). L'utilisation d'un tuba augmente les résistances ventilatoires et majore le gradient de pression entre la surface et le centre pneumoïque (Hong *et al.*, 1960). L'effort inspiratoire est ainsi majoré et l'expiration passive facilitée (Corriol 2006c). Ces contraintes ventilatoires sont d'autant plus marquées que l'apnée s'associe à un effort en eau froide (Jammes *et al.*, 2006).

L'exercice intense produit des valeurs de pression artérielle pulmonaire proche de 25 mmHg à la base du poumon qui vont être majorées par l'hypoxie. Cette hyperpression provoque des contraintes mécaniques sur le capillaire pulmonaire qui peuvent aboutir à de véritables lésions de la membrane alvéolocapillaire appelées par les anglo-saxons « stress capillary failure » (Hopkins *et al.*, 1997). En effet, l'hyperpression entraîne une ouverture des jonctions intercellulaires de l'endothélium capillaire, suivie de lésions de l'endothélium capillaire puis de l'épithélium alvéolaire associé à un décollement des cellules épithéliales de leur membrane basale. Cette défaillance mécanique alvéolocapillaire, majorée par l'hyperventilation, met en relation directe la lumière capillaire et alvéolaire, et entraîne le passage du plasma et des globules rouges dans les alvéoles (West et Mathieu-Costello, 1992). De plus, la répétition d'arrêts ventilatoires entrecoupée de phases d'hyperventilation peuvent être à l'origine d'un stress oxydatif avec altérations biochimiques membranaires et syndrome inflammatoire post immersion (Wilmshurst 2004 ; Joulia *et al*., 2006).

Le froid provoque une inflammation des bronches ainsi qu'une vasoconstriction avec augmentation des résistances périphériques et redistribution du volume sanguin vers le thorax (Veicsteinas *et al*., 1982 ; Park *et al*., 1999). L'augmentation du volume sanguin intra-thoracique provoque un réflexe de bradycardie qui se majore lors de l'immersion de la face (Hall *et al.*, 1998 ; Weston *et al.*, 1987).

L'augmentation de la pression absolue avec la profondeur entraine une diminution du volume pulmonaire (loi de Boyle et Mariotte) qui facilite la redistribution des volumes sanguins périphériques vers le thorax. Ce phénomène est appelé par les anglo-saxons « blood shift ». La chute des volumes gazeux est également à l'origine de l'apparition d'une pression négative intra alvéolaire qui devient majeure lorsque la capacité pulmonaire totale se rapproche du volume résiduel.

Ces différents mécanismes provoquent une augmentation de la pression transmurale qui peut aboutir à une transsudation avec constitution d'un œdème intra alvéolaire voire une rupture de la membrane alvéolocapillaire avec passage de globules rouges en intra-alvéolaire. L'apnéiste présente alors une dyspnée associée à une toux et une expectoration mousseuse pouvant être hémoptoïques. La symptomatologie disparaît en moins de 24 heures lorsque l'apnéiste est extrait de l'environnement contraignant. Dans les cas les plus sévères, l'accident cardio-vasculaire peut s'associer à une insuffisance cardiaque transitoire et/ou à une ischémie myocardique. En cas de cardiopathie sous-jacente, une défaillance cardiaque majeure peut survenir très rapidement sur les lieux de la plongée.

L'accident cardio-vasculaire d'immersion, appelé plus largement accident cardio-vasculaire d'immersion peut être prévenu par une visite de non contre-indication à la pratique de l'apnée. Cette consultation permet de rechercher une pathologie cardiaque sous-jacente et d'inciter l'apnéiste à maintenir une activité physique régulière. La limitation de l'effort immergé, la gestion du froid, l'utilisation d'un tuba adapté, la restriction de profondeur et la maîtrise de la carpe en cas de plongées profondes sont également des axes de prévention.

3.3.3.3 Les barotraumatismes

Le barotraumatisme pulmonaire

Le barotraumatisme pulmonaire est beaucoup plus rare qu'en scaphandre autonome.

Il peut survenir à la descente, en lien avec l'augmentation de la pression hydrostatique qui entraine une compression du volume gazeux pulmonaire pouvant conduire à une inondation broncho-alvéolaire. Ces situations exceptionnelles sont rapportées chez les apnéistes entrainés évoluant à des profondeurs moyennes de 25 à 35 mètres avec des immersions itératives et nombreuses. Dans d'autres circonstances, l'hémorragie intra alvéolaire est favorisée par une manœuvre de la carpe ou « buccal pumping » non maitrisée en surface ou par des contractions diaphragmatiques volontaires effectuées en profondeur, afin d'augmenter la durée d'apnée (Kiyan *et al*., 2001). La présence de contractions diaphragmatiques involontaires liées à l'hypercapnie, est également délétère.

Le barotraumatisme pulmonaire peut aussi survenir lors de la phase de décompression, lorsque l'apnéiste remonte à glotte fermée après avoir ventilé sur l'embout d'un plongeur en scaphandre autonome. Dans d'autres situations, une remontée très rapide avec blocage expiratoire chez les chasseurs sous-marins atteignant des profondeurs importantes expose à la possibilité de pneumothorax et d'aéroembolismes cérébraux. La ré-expansion brutale des gaz alvéolaires se fait alors que la redistribution de la masse sanguine du poumon vers la grande circulation est plus lente (Ferrigno 2004). Les volumes gazeux ainsi piégés peuvent faire effraction dans les tissus interstitiels et/ou dans la circulation artérielle (Malpieri 2003).

Des tableaux similaires ont été décrits lors de plongées conformes, peu profondes, chez des sujets jeunes, sportifs, sans antécédents respiratoires. La physiopathologie de ce type d'accident n'est pas complètement élucidée. Des différences de compliance entre certains segments dues à des anomalies anatomiques ou fonctionnelles préexistantes sont susceptibles de favoriser la séquestration des gaz alvéolaires (air trapping) à la remontée. Les lésions emphysémateuses et

l'hyper réactivité bronchique méconnues peuvent suffire à induire un blocage à l'évacuation alvéolaire (Gheyssens 1998).

Les premiers signes apparaissent dès la sortie de l'eau. Dans les cas les plus graves, l'apnéiste présente une douleur thoracique, une dyspnée avec une toux hémoptoïque associées à une détresse respiratoire, à des troubles neurologiques et/ou cardiologiques. Le barotraumatisme pulmonaire se manifeste le plus souvent par une symptomatologie fruste à type de toux sèche, de dyspnée d'effort, de gêne thoracique ou d'emphysème sous cutané isolé.

Une recherche de pathologies sous-jacentes (asthme, maladie bulleuse, antécédent de pneumothorax spontané…) lors de la visite médicale, un échauffement systématique et une limitation de la profondeur en limitent les risques.

Le barotraumatisme de l'oreille

Le barotraumatisme de l'oreille moyenne est la lésion la plus classique de l'apnéiste débutant. Elle est secondaire à une non maîtrise de la vitesse de descente ou à une manœuvre de Valsalva intempestive à la remontée.

La visite médicale à la recherche d'une dysperméabilité constitutionnelle, le contrôle des épisodes infectieux intercurrents, la maîtrise des techniques de descente et d'équilibration sont les principaux axes de prévention.

Le barotraumatisme sinusien

Le barotraumatisme sinusien est favorisé par des épisodes infectieux ou allergiques de la sphère ORL. Il est toutefois moins fréquent que le barotraumatisme de l'oreille moyenne. Il survient dès les premiers mètres et peut empêcher la descente.

Le barotraumatisme facial

Le barotraumatisme facial est un accident rare dont les premiers signes apparaissent lors de la descente.

L'utilisation d'un matériel adapté et l'insufflation de gaz dans le masque tout au long de la descente évitent cet accident.

Le barotraumatisme dentaire

Cet accident est rarissime.

Un simple examen buccodentaire régulier prévient ce risque.

Le barotraumatisme digestif

Les variations de volumes gazeux dans l'estomac et le tube digestif peuvent engendrer un inconfort, pouvant aller, dans de rare cas, jusqu'à une rupture de la paroi digestive.

Des règles hygiéno-diététiques comme éviter un repas copieux avant de plonger et la prise de boissons gazeuses limitent cet incident, tout comme la recherche de pathologies digestives (ulcère gastroduodénal, maladie inflammatoire chronique de l'intestin, diverticulose…) qui peuvent provoquer une fragilité de la paroi.

3.3.3.4 L'hypercanie

L'hypercapnie est générée par des durées d'apnée trop importantes et des temps de récupération trop court, empêchant une normalisation de la capnie ($PpCO_2$) entre chaque apnée.

La limitation des durées d'apnée et le respect des temps de récupération permettent d'éviter cet incident.

3.3.3.5 Les accidents neurologiques

L'accident neurologique est un accident rare dont l'origine physiopathologique reste discutée. Il se traduit par un accident vasculaire cérébral dont la clinique dépend du territoire atteint. Il se manifeste par des céphalées associées à une atteinte des paires crâniennes et une altération sensitivomotrice périphérique (trouble de la sensibilité avec paralysie d'un membre ou d'un hémicorps). Dans les cas les plus graves, il se traduit par une paralysie avec détresse respiratoire, perte de connaissance et/ou crise convulsive, pouvant se compliquer d'une noyade.

L'hypothèse principale est l'ADD aussi appelé « Taravana syndrome » (Corriol 2006a). Il est lié à une saturation des tissus à l'azote consécutive à une plongée très profonde ou à une succession de plongées, associée à une vitesse de remontée rapide et à une absence de palier de décompression. En effet, lors de la remontée, l'inversion du gradient de pression entraine un relargage d'azote sous forme bullaire. L'engorgement du filtre pulmonaire et/ou la perméabilisation d'un shunt droit-gauche peut aboutir à un passage de bulles sur le versant artériel avec un risque d'embolie gazeuse cérébrale. D'autres hypothèses évoquent la possibilité d'une embolie gazeuse cérébrale d'origine barotraumatique ou d'un vasospasme hypoxique.

La limitation de la profondeur et de la durée ainsi que l'interdiction de pratiquer l'apnée dans les 12 heures qui suivent une plongée en scaphandre autonome sont des axes de prévention tout comme l'absence de plongée en scaphandre dans les 12 heures qui suivent des apnées à plus de 20 mètres. Certains apnéistes proposent la réalisation d'un palier en apnée ou l'utilisation d'un palier à l'oxygène ; néanmoins, la réalisation de tels paliers en apnée semble peu compatible avec un contexte professionnel et le bénéfice non démontré.

4 Conclusions de l'expertise

Description des mentions/pratiques/populations

Les travailleurs en hyperbarie interviennent en milieu immergé (scaphandriers, scientifiques, militaires, secours…) ou sans immersion (tubistes, personnel médical…). Les interventions en milieu hyperbare nécessitent une adaptation du travailleur à un environnement professionnel très particulier.

En France, le décret n° 2011-45 du 11 janvier 2011 encadre la pratique des activités professionnelles en conditions hyperbares. Pour intervenir dans un environnement pressurisé, tout travailleur doit être titulaire d'un certificat d'aptitude à l'hyperbarie (CAH) dont la Mention et la Classe spécifient respectivement le type d'activités professionnelles exercées et les zones de pressions (profondeurs) autorisées. Si la réglementation actuelle définit les méthodes d'interventions et les mélanges gazeux respiratoires autorisés en fonction des secteurs d'activités, elle ne prévoit pas de dispositions particulières pour la mise en œuvre des recycleurs ou la pratique de l'apnée.

Ce constat apparait similaire au niveau international. Suite à une consultation internationale initiée par l'Anses et concernant l'Europe et l'Amérique du Nord (Etats-Unis et Canada), de nombreuses références ont été recueillies traitant avant tout des principes d'organisation, de responsabilité, de formation, de sécurité du matériel, *etc*. Plusieurs textes ou normes évoquent les mélanges gazeux autres que l'air ainsi que la vérification visant à éviter la contamination du mélange gazeux ou de l'air. Quelques éléments ont également pu être collectés directement ou indirectement concernant les recycleurs, les correspondants répondant que les consignes ou les prescriptions s'appliquant au matériel et à l'équipement s'étendent *de facto* aux recycleurs. Enfin peu ou voir aucun élément n'a été transmis concernant l'encadrement de l'apnée professionnelle.

D'après les éléments recensés auprès des différents acteurs interrogés au cours de cette expertise, le nombre total de travailleurs exposés aux conditions hyperbares en France est estimé à 10000 personnes. Les domaines d'activité représentés sont très diversifiés, de même que les méthodes d'intervention en milieu hyperbare qui sont propres à chaque métier.

Interventions aux mélanges gazeux respiratoires autres que l'air

Sur un plan sanitaire, tout travailleur hyperbare est soumis aux risques inhérents à son activité auxquels s'ajoutent les risques spécifiques liés à l'environnement hyperbare. Ces derniers sont liés à l'adaptation de l'organisme aux variations de la pression extérieure ainsi qu'aux variations de pressions partielles des différents gaz respirés. Toute variation d'un ou plusieurs de ces paramètres peut entraîner des perturbations plus ou moins graves, avec toutefois une certaine marge de tolérance, voire même d'accoutumance. Ainsi un effet d'adaptation n'entrainera pas nécessairement un effet néfaste sur l'organisme humain. Néanmoins, l'exposition à des conditions hyperbares peut conduire à des manifestations pathologiques aiguës ou chroniques (barotraumatismes, intoxications dues aux gaz inhalés, accidents de désaturation…), de sévérité variable (de la simple gêne au niveau des oreilles jusqu'au décès), apparaissant pendant ou après un séjour à une pression supérieure à la pression atmosphérique. Les conditions de travail en milieu contraignant (milieu aqueux, souterrains, activités de soudage, *etc*) peuvent également entraîner des accidents spécifiques à l'activité exercée.

Toutes mentions confondues et quelle que soit la technique d'intervention mise en œuvre, l'air est le mélange gazeux respiratoire le plus utilisé pour les interventions en conditions hyperbares. Néanmoins, son utilisation se heurte aux limites physiologiques liées à la toxicité des gaz respiratoires et en particulier de l'azote (risques de narcose, d'accident de désaturation et d'essoufflement), ainsi qu'à des limites techniques. Le risque de survenue d'une narcose à l'azote

devient important pour tous les travailleurs intervenant à l'air à partir de 6 bars de pression absolue (profondeur équivalente de 50 mètres).

Les interventions hyperbares réalisées en respirant des mélanges gazeux autres que l'air permettent de pallier certaines contraintes physiologiques imposées par la plongée à l'air. La réglementation définit les gaz respiratoires autorisés lors des interventions en conditions hyperbares ainsi que les exigences à respecter en termes de composition de ces gaz (pressions partielles maximales, concentrations limites des polluants). Les interventions aux mélanges sont déjà très développées dans certains secteurs professionnels de la Mention B (défense, sécurité civile, spéléologie, photo-vidéographie sous-marine, *etc.*) et leur mise en œuvre dans les bonnes conditions, permet d'apporter une sécurité plus importante en cours d'intervention.

De nombreuses publications étudient spécifiquement les effets sanitaires liés à la respiration d'oxygène pur en conditions hyperbares dans un contexte professionnel, principalement pour la décompression ou le traitement médical, et une littérature moindre analyse les autres mélanges gazeux. Cependant, de nombreux ouvrages de référence sur les principes théoriques relatifs aux effets des gaz apportent des informations sur les avantages et les inconvénients sur le plan sanitaire des mélanges gazeux.

L'utilisation des mélanges gazeux respiratoires autres que l'air lors des interventions hyperbares présente l'avantage de diminuer (fortement dans le cas de l'Héliox) les risques d'effets narcotiques liés aux gaz inertes. Techniquement, la mise en œuvre de ces pratiques est plus onéreuse que l'usage d'air comprimé, de par la nécessité d'un équipement spécifique et le fait que l'approvisionnement et la fabrication des mélanges soient plus complexes. Le tableau suivant présente les intérêts et inconvénients, tant sur le plan sanitaire qu'en termes technique et de confort d'utilisation, de l'utilisation des mélanges gazeux autres que l'air.

Tableau 13 : Synthèse des propriétés spécifiques à la composition de chaque type de mélange

Mélange gazeux respiratoire	Sur le plan sanitaire		Au niveau technique et en termes de confort d'utilisation	
	Avantages par rapport à l'air	***Inconvénients par rapport à l'air***	***Avantages par rapport à l'air***	***Inconvénients par rapport à l'air***
Paliers de décompression à l'oxygène pur et aux mélanges suroxygénés	limitation du risque d'ADD	risque d'hyperoxie (crise convulsive, décompensation cardiorespiratoire)	- optimisation de la décompression - réduction de la durée des paliers de décompression - réduction de la fatigue - réduction de la durée en surface entre 2 interventions successives	risques d'incendie pour une utilisation en atmosphère sèche
NITROX (en mélange fond)	- limitation du risque d'ADD - limitation du risque de narcose	risque d'hyperoxie	- optimisation de la décompression (lors de l'utilisation du Nitrox suivant un profil de décompression à l'air) - réduction de la durée des paliers de décompression - réduction de la fatigue - réduction de la durée en surface entre 2 interventions successives	limitation de la pression maximale (ou profondeur) d'intervention
NITRHELIOX	- diminution des risques : ○ d'hyperoxie ○ d'hypercapnie - amélioration des performances ventilatoires et diminution du risque d''essoufflement	refroidissement de l'organisme	augmentation de la pression maximale (ou profondeur) d'intervention	Mélanges constitués d'hélium : - augmentation de la durée des paliers de décompression - prix élevé de l'hélium
HELIOX	amélioration des performances ventilatoires et diminution du risque d''essoufflement	refroidissement de l'organisme	augmentation importante de la pression maximale (ou profondeur) d'intervention	

Interventions en recycleur

Les recycleurs sont des équipements autonomes pour le travail hyperbare qui récupèrent les gaz expirés pour les réutiliser, évitant au travailleur d'être équipé de nombreuses bouteilles de gaz. Ils offrent au travailleur une autonomie et une aisance supérieures à celles apportées par les appareils à circuit ouvert et présentent plusieurs avantages, suivant leur mode de fonctionnement (circuit fermé et semi-fermé ; à régulation mécanique ou électronique) : augmentation du temps de l'intervention sous pression, stabilisation de la pression partielle en oxygène, limitation des contraintes thermiques, *etc*. Les limites de ces appareils en matière de sécurité d'intervention concernent principalement la gestion électronique des paramètres de l'intervention, susceptible d'atténuer l'attention du travailleur et sujette aux pannes (le solénoïde et les cellules oxygène notamment).

Sur un plan sanitaire, en dehors des accidents de désaturation (ADD) et des accidents barotraumatiques dont la survenue est en général indépendante du type d'appareil respiratoire utilisé, il existe d'autres accidents survenant lors des interventions en conditions hyperbares liés directement à l'emploi des mélanges et des recycleurs. Ces accidents sont pour la plupart des accidents biochimiques (hypoxie, hyperoxie et hypercapnie) liés le plus souvent à un défaut de fonctionnement du recycleur ou à un non-respect des consignes d'utilisation de l'appareil par le

travailleur. Le risque le plus important des accidents biochimiques reste la perte de connaissance qui, en milieu aquatique, peut en l'absence de précautions spécifiques, engendrer la noyade dont l'issue est presque toujours fatale. Les accidents cardio-vasculaires d'immersion peuvent être favorisés par l'emploi du recycleur.

L'utilisation des recycleurs n'est pas prévue par la réglementation, expliquant qu'elle reste encore confidentielle. Certains secteurs professionnels de la Mention B tels que la défense, la spéléologie ou la photo-vidéographie sous-marine ont néanmoins développé l'usage de ce type d'appareils. Une utilisation de cette technique lors de plongées plus classiques pourrait s'avérer pertinente en termes de sécurité parce qu'elle permet une durée de survie plus longue en cas d'incident et offre la possibilité de gérer l'incident, même à grande profondeur, permettant par exemple au plongeur de regagner la tourelle ou la bulle de plongée afin d'être remonté.

Peu de références bibliographiques sur l'accidentologie et les effets aigus ou chroniques en lien avec l'usage des recycleurs dans un contexte professionnel ont été recensées. Des retours d'expérience sont disponibles, mais ils concernent principalement les activités de la Marine nationale. Une analyse des accidents liés à l'utilisation des recycleurs et mélanges de gaz au sein de la Marine nationale sur une période d'environ 20 ans a permis d'estimer le risque d'accident à 1 sur 6000 plongées. Les accidents les plus fréquents sont les accidents biochimiques (60% de l'ensemble des accidents, répartis en 40% d'hypercapnie, 30% d'hyperoxie et 30% d'hypoxie) qui surviennent quel que soit le type de recycleur, suivis par les ADD (15% : recensés avec l'utilisation de mélanges Nitrox à 40% ou 30% d'O_2), beaucoup moins fréquents qu'en plongée à l'air. Sur ces 20 années analysées, 3 décès ont été recensés ; 2 à l'oxygène pur et 1 au mélange ternaire. La population des militaires est caractérisée par sa jeunesse, sa condition physique, la rigueur de ses procédures et de leur mise en œuvre ; par ailleurs, les profils d'intervention sont principalement des plongées carrées. Il est ainsi difficile d'extrapoler ces données aux autres secteurs d'activité qui ne bénéficient pas du même contexte d'application.

Interventions en apnée

L'apnée est une pratique fondamentalement différente de la plongée en scaphandre autonome. Sa mise en œuvre dans un cadre professionnel demeure encore ponctuelle mais se développe au sein de la Mention B pour diverses activités telles que le contrôle visuel de l'état des cages d'élevage de poissons en mer, la pêche à la palourde, le suivi ichtyologique de la faune sous-marine et le prélèvement d'échantillons par les plongeurs scientifiques… L'atout principal de l'apnée réside dans sa souplesse d'utilisation. Il s'agit en effet d'une méthode d'intervention facile et rapide à mettre en œuvre puisqu'elle nécessite une logistique légère. Le travail en apnée est néanmoins contraint par le fait que la durée et la profondeur des incursions sont limitées.

Actuellement, le décret ne prévoit aucune formation ou aptitude spécifique pour la pratique de l'apnée professionnelle. La mise en œuvre de l'apnée dans un cadre professionnel est autorisée uniquement pour les travailleurs classés de la Mention B et sous réserve que la pression relative d'exposition ne soit pas supérieure à 1 000 hectopascals (10 mètres de profondeur) (exception faite des encadrants professionnels de plongée loisir qui doivent suivre les dispositions spécifiques prévues par le Code du sport). Compte tenu de la spécificité de cette pratique, il devrait être possible de la mettre en œuvre indépendamment d'une qualification à la plongée en scaphandre autonome.

L'apnée n'expose pas le plongeur aux mêmes risques sanitaires que lors d'une plongée en air avec bouteille et peut conduire à des pathologies spécifiques. Un accident majeur caractérise cette pratique : la syncope. Cet accident se traduit par une perte de conscience potentiellement compliquée par une noyade en l'absence de secours et justifie à lui seul, l'ensemble des dispositions préventives sécuritaires enseignées et appliquées dans le cadre de la pratique de l'activité**.** L'apnéiste est également soumis aux risques de barotraumatismes (pulmonaire, oreilles, sinus, face, dents, tube digestif…), d'accident cardio-vasculaire d'immersion, d'hypercapnie et d'accidents neurologiques (forme d'accident vasculaire cérébral), dont les mécanismes restent encore mal définis.

Par ailleurs, il existe actuellement peu de retours d'expérience ou de références bibliographiques concernant les effets à long terme induits par la pratique de l'apnée en tant que méthode d'intervention professionnelle.

Parmi les éléments recensés au cours de cette expertise, certains témoignent des nouvelles perspectives qu'offrent les mélanges gazeux autres que l'air, les recycleurs et l'apnée dans le secteur des interventions professionnelles en milieu hyperbare. Toutefois, la mise en œuvre de ces pratiques présente des risques spécifiques pour la santé des travailleurs qui imposent des recommandations en termes de matériels, de formations et de procédures. En effet, la survenue des différents accidents identifiés dépend d'une combinaison de multiples facteurs : en premier lieu, la nature des gaz constituant le mélange respiratoire, la pression à laquelle ces gaz vont être utilisés et le type de matériel mis en œuvre auxquels viennent s'ajouter les conditions environnementales de l'intervention et l'état de santé du travailleur.

5 Recommandations

Les experts, au regard de l'ensemble des éléments portés à leur connaissance au cours de la réalisation de cette expertise, établissent une série de recommandations destinées à améliorer la sécurité et le confort des travailleurs lors des interventions en conditions hyperbares. Les recommandations ont été hiérarchisées, afin de faire ressortir les actions prioritaires à mettre en œuvre. Suivant une importance décroissante, 3 niveaux ont ainsi été associés aux différentes propositions selon qu'elles sont 1) fortement recommandées, 2) recommandées ou 3) conseillées.

En termes de prévention

GENERALITES SUR LES INTERVENTIONS EN CONDITIONS HYPERBARES

- Il est recommandé pour toutes les mentions de ne pas intervenir à l'air au-delà de 6 bars de pression absolue (profondeur équivalente : 50 mètres) pour limiter le risque important de narcose. L'utilisation de mélanges gazeux autres que l'air est ainsi fortement recommandée dans ces conditions.

- Toutefois, en cas d'interventions à l'air entre 6 et 7 bars de pression absolue (profondeurs équivalentes : 50 et 60 mètres)[7], afin de limiter le risque d'accident de désaturation (ADD), il est fortement recommandé :
  - de ne pas dépasser 10 minutes en durée de travail ;
  - d'effectuer des paliers à l'oxygène pur à 1,6 bar de pression absolue (6 mètres de profondeur).

- Afin d'assurer la traçabilité des interventions et des accidents en conditions hyperbares professionnelles :
  - Il est fortement recommandé de rajouter dans le livret individuel de suivi des interventions ou d'exécution de travaux en milieu hyperbare, une partie spécifique concernant l'utilisation des mélanges, des recycleurs et de l'apnée avec l'accidentologie spécifique, les pratiques à risque, les dysfonctionnements des matériels et les effets sanitaires à court et long terme.

  - Il est recommandé de mettre en place une base de données nationale recensant l'ensemble des paramètres d'exposition et des accidents survenus en hyperbarie professionnelle. L'analyse des éléments collectés au sein de cette base devra s'inscrire dans une démarche de retour d'expérience associée à un processus d'assurance qualité.

[7] Situations exceptionnelles d'interventions et de travaux exécutés en milieu hyperbare prévues à l'article R. 4461-49 du Décret n° 2011-45 du 11 janvier 2011.

- Il est recommandé que les autorités compétentes organisent le contrôle de la mise en œuvre sur le terrain de l'encadrement adapté à l'utilisation des recycleurs et des mélanges, avec une surveillance prioritaire des mélanges à base d'hélium.

INTERVENTIONS AUX MELANGES GAZEUX RESPIRATOIRES AUTRES QUE L'AIR

1/ INTERVENTIONS AUX MELANGES, TOUS TYPES DE MELANGES CONFONDUS

- Il est fortement recommandé pour toutes les mentions d'utiliser des mélanges autres que l'air pour toute intervention au-delà de 6 bars de pression absolue (profondeur équivalente : 50 mètres).

- Afin d'éviter les accidents de désaturation, il est fortement recommandé de limiter le nombre d'interventions sous pression :
  - à 1 par jour, pour toute intervention aux mélanges effectuée à une pression absolue supérieure à 6 bars ;
  - à 2 par jour, pour les interventions réalisées entre 6 et 7 bars de pression absolue avec palier de décompression aux mélanges Nitrox, sous réserve de disposer d'un caisson hyperbare et d'un personnel médical ou paramédical hyperbariste à l'aplomb du chantier.

- Il est fortement recommandé de limiter à 10 bars de pression absolue (profondeur de 90 mètres) la pression maximale autorisée pour les interventions aux mélanges en scaphandre autonome (circuit-ouvert ou recycleur). Au-delà de cette limite, la mise en œuvre de telles interventions reste possible, au cas par cas, après accord des autorités compétentes.

- Il est fortement recommandé d'adapter les cursus de formation à l'apprentissage des interventions aux mélanges en vue d'une mise en œuvre professionnelle de cette pratique, au sein d'organismes certifiés/agréés. Au moment de l'habilitation ou de la certification de ces organismes, les autorités compétentes devront s'assurer que les prérequis adaptés ont été mis en place pour intégrer les formations en question.

- Il est fortement recommandé d'appliquer les normes européennes définissant les équipements et matériels utilisés lors des interventions avec des mélanges gazeux :
  - NF EN 144-3 : 2003 / Appareils de protection respiratoire - Robinets de bouteille à gaz - Partie 3 : raccords de sortie pour gaz de plongée Nitrox et oxygène ;
  - NF EN 13949 : 2003 / Appareils respiratoires - Appareils de plongée autonome à circuit ouvert utilisant du Nitrox et de l'oxygène comprimé - Exigences, essai, marquage, etc) ;
  - NF EN 15333-1 : 2011 / Équipements respiratoires - Appareils de plongée narguilé à gaz comprimé et à circuit ouvert ; Partie 1 : Appareils à la demande ;
  - NF EN 15333-2 : 2011 / Équipements respiratoires - Appareils de plongée narguilé à gaz comprimé et à circuit ouvert ; Partie 2 : Appareils à débit continu.

- Pour les interventions aux mélanges suroxygénés, il est fortement recommandé d'utiliser du matériel « qualité oxygène » (défini par la norme NF EN 144-3 : 2003, qui précise que les produits d'entretien des matériels doivent être compatibles avec l'emploi d'oxygène).

- Il est recommandé de privilégier un approvisionnement en mélanges prêts à l'emploi (étiquetés et analysés par le fournisseur).

- En cas de transfert de mélanges gazeux prêts à l'emploi du récipient original vers un autre contenant, il est fortement recommandé que l'opérateur vérifie la conformité du mélange transféré avec les caractéristiques du mélange initial (pourcentage des gaz constitutifs du mélange).

- En cas de préparation des mélanges gazeux, il est fortement recommandé que l'opérateur respecte un délai de repos de 12h après la préparation (temps nécessaire pour obtenir la stabilité du mélange gazeux) avant de contrôler le pourcentage des gaz constitutifs du mélange et d'effectuer l'étiquetage final.

- Il est fortement recommandé de respecter des procédures spécifiques lors de l'utilisation des mélanges
  - **Avant l'intervention**
    - Choix du mélange adapté à la pression de l'intervention ;
    - Contrôle du pourcentage d'oxygène du mélange dans la bouteille avec traçabilité dans le registre de contrôle et étiquetage de la bouteille ;
    - Montage des détendeurs spécifiques pour les mélanges sur la bouteille ;
    - Planification, mise en place d'une chronologie de l'utilisation des différents mélanges gazeux durant l'intervention (« run time ») et détermination de la profondeur limite ;
    - Choix de l'outil de décompression et réglage du pourcentage d'oxygène en cas d'utilisation d'un ordinateur.

  - **Pendant l'intervention**
    - Respect de la chronologie d'utilisation des différents mélanges gazeux, de la profondeur limite, de la durée fond du niveau maximal d'intervention et du profil de décompression ;
    - Limitation des efforts ;
    - Contrôle itératif de la PpO_2 du mélange respiré en cas d'utilisation de recycleur à PpO_2 constante.

  - **Après l'intervention**
    - Rangement du matériel spécifique à l'utilisation des mélanges, ne pas mélanger avec le matériel courant ;
    - Remplissage de la fiche d'intervention spécifique aux mélanges.

2/ INTERVENTIONS AUX MELANGES BINAIRES N_2/O_2 (NITROX)

Les mélanges binaires N_2/O_2 ou Nitrox désignent un mélange d'air suroxygéné, c'est-à-dire dont le pourcentage d'oxygène dépasse 21%. Suivant le pourcentage d'oxygène qu'ils contiennent, ces mélanges pourront être utilisés en gaz « fond » ou en gaz de décompression.

Comparativement à l'air, l'utilisation d'un mélange Nitrox permet :

- une optimisation de la désaturation lorsqu'il est utilisé avec un profil de décompression air
- une réduction de la durée d'immersion dans les environnements contraignants.

Utilisation en gaz « fond » : Nitrox avec 30 à 60% d'O_2 // PpO_2 limitée à 1,4 bar

➢ L'utilisation du Nitrox en gaz fond est recommandée pour :
  - les profils « yoyo », (dites « ludion ») ;
  - les interventions successives ;
  - les interventions avec paliers de décompression ;
  - les interventions en altitude ;
  - lors d'un effort physique intense.

Par ailleurs, le Nitrox présente l'avantage d'être facile à fabriquer comparativement aux mélanges ternaires.

Utilisation en décompression : Nitrox à plus de 80% d'O_2 (« Surox ») // PpO_2 limitée à 1,6 bar

➢ L'utilisation du Nitrox en décompression est recommandée lors :
  - d'interventions à des pressions élevées (à partir de 5 bars soit une profondeur équivalente de 40 mètres), en respectant les limites de la prise de risque due à la toxicité de l'oxygène ;
  - d'interventions avec paliers de décompression ;
  - d'interventions avec effort physique intense ;
  - d'une procédure de rattrapage après une vitesse de remontée rapide ou un palier écourté.

3/ INTERVENTIONS AUX MELANGES BINAIRES He/O_2 (HELIOX)

Les mélanges binaires He/O_2 ou Héliox désignent un mélange constitué d'oxygène et d'hélium

➢ Pour des interventions à des pressions absolues supérieures à 8 bars ou pour la plongée profonde (au-delà de 70 mètres), l'utilisation de mélanges Héliox est conseillée comparativement aux mélanges ternaires car :
  - une table de décompression validée est disponible pour ces profils d'interventions ;
  - l'Héliox présente l'avantage d'être facile à fabriquer comparativement aux mélanges ternaires.

4/ INTERVENTIONS AUX MELANGES TERNAIRES $N_2/He/O_2$ (NITRHELIOX)

Les mélanges ternaires $N_2/He/O_2$ ou Nitrhéliox désignent un mélange respiratoire constitué d'oxygène, d'azote et d'hélium.

➢ L'utilisation de mélanges Nitrhéliox est recommandée dès 6 bars de pression absolue (profondeur équivalente de 50 mètres).

5/ DECOMPRESSION A L'O_2 PUR

- La réalisation de paliers de décompression à l'oxygène pur est fortement recommandée :
  - pour les interventions à des pressions élevées (à partir de 5 bars soit une profondeur équivalente de 40 mètres) ;
  - pour les interventions avec paliers de décompression ;
  - pour les interventions avec effort physique intense ;
  - pour les interventions des mentions C ;
  - lors d'une procédure de rattrapage après une vitesse de retour à la pression atmosphérique (soit 1 bar de pression absolue) rapide ou un palier écourté.

- En milieu humide, il est fortement recommandé de réaliser ses paliers en utilisant une ligne à paliers fixe ou dérivante.

6/ OUTILS DE DECOMPRESSION

L'utilisation des mélanges par les professionnels intervenant en conditions hyperbares nécessite la mise à disposition par les autorités compétentes d'outils de décompression validés pour une utilisation dans un cadre professionnel.

A cet effet, il est fortement recommandé de :

- Définir une méthode permettant de valider des outils de décompression pour l'utilisation des mélanges gazeux dans un cadre professionnel ou à défaut, proposer des modèles de décompression.

- Dans l'attente, définir les critères afin de permettre l'utilisation des outils de décompression existants.

MATERIELS

- Il est fortement recommandé d'harmoniser les matériels d'intervention en milieu hyperbare au sein d'une même entreprise, notamment les matériels associés aux gaz respiratoires (détendeurs et ordinateurs d'aide à la décompression présentant les mêmes caractéristiques et adaptés aux milieux d'intervention).

- Il est fortement recommandé d'homogénéiser les techniques d'intervention mises en œuvre sur un chantier hyperbare, qu'il s'agisse des gaz respiratoires ou des matériels utilisés. La multiplicité des méthodes d'intervention sur un même chantier pour effectuer une même tâche étant source d'accidents.

- Afin d'assurer la prophylaxie des maladies transmissibles par l'intermédiaire de certains microorganismes (staphylococcie, tuberculose, herpès, hépatites, amibes, candidose…), il est recommandé de mettre en place des protocoles de désinfection des matériels respiratoires, adaptés aux conditions d'intervention.

1/ INTERVENTIONS EN SCAPHANDRE AUTONOME EN CIRCUIT OUVERT

- Lors de l'utilisation du scaphandre autonome en circuit ouvert, la respiration de mélanges « fond » Nitrox doit être si possible privilégiée car elle apporte un gain en termes de sécurité (décompression réduite, meilleur confort de plongée, moins de fatigue…).

- Pour des interventions au-delà de 10 bars de pression absolue (profondeur équivalente de 90 mètres), l'utilisation d'un scaphandre autonome en circuit ouvert n'est pas adaptée. L'utilisation des recycleurs peut être envisagée, mais la plongée avec tourelle doit être cependant privilégiée, notamment pour les travailleurs de la mention A.

2/ INTERVENTIONS EN RECYCLEURS

- Pour les interventions nécessitant de la discrétion, de l'autonomie en gaz, du confort thermique ou une optimisation de la décompression, il est conseillé d'utiliser un recycleur.

- Pour les interventions au-delà de 10 bars de pression absolue (profondeur équivalente de 90 mètres), il est fortement recommandé de privilégier l'utilisation d'une tourelle pour les interventions humaines ou d'un robot télé-opéré depuis la surface (ROV). A défaut, il est recommandé de remplacer le circuit ouvert par un recycleur agréé pour la profondeur maximale d'intervention.

- A pression absolue élevée, en particulier en Offshore, le recycleur peut être conseillé comme moyen de secours pour garantir une autonomie suffisante pour atteindre la tourelle en cas de panne sur l'alimentation en fluides respiratoires.

- Il est fortement recommandé de mettre en place une formation spécifique dispensée par un organisme certifié/agréé comprenant :
  - Une formation initiale sur le type de recycleur (fermé, semi-fermé), pour une utilisation dans un cadre professionnel ;
  - Une formation complémentaire sur l'appareil spécifique mis à disposition par l'employeur et adaptée aux tâches réalisées par le professionnel.

- Il est fortement recommandé de réaliser une formation pour le maintien des acquis dont la fréquence devrait être inférieure à 5 ans ;

- Il est fortement recommandé d'anticiper la posture de travail et le type de tâche des personnels avant de choisir le recycleur, afin d'assurer la meilleure ergonomie possible au poste de travail.

- Concernant la mise à disposition de recycleurs au sein d'une entreprise, il est fortement recommandé que l'employeur :
  - Privilégie les appareils personnalisés (1 recycleur personnel pour chaque travailleur) afin de limiter les risques liés à la maintenance et la préparation de l'appareil avant intervention (notamment le remplissage de la chaux sodée) ;
  - *A minima*, le travailleur doit obligatoirement préparer l'appareil qu'il va utiliser en intervention (mise en service et reconditionnement de l'appareil) ;

- Il est fortement recommandé de respecter rigoureusement les préconisations de fonctionnement, d'entretien et de maintenance définies par le constructeur de l'appareil utilisé ;

- Il est fortement recommandé de suivre des mesures de sécurité spécifiques en plongée :
  - Limiter les tâches demandant un effort physique intense ou un outillage trop important pour prévenir le risque d'hypercapnie ;
  - Intervenir systématiquement en binôme, avec le même type d'appareil, de mélange et de procédure de décompression ;
  - Utiliser obligatoirement une sangle d'embout et un couvre-lèvres pour maintenir le système (embout buccal) en bouche en cas de perte de connaissance et prévenir le risque de noyade ;
  - Privilégier la mise en place d'une redondance en circuit-ouvert sur la machine, alimentée avec des mélanges utilisables à la profondeur maximale d'intervention ou à minima, assurer la redondance par un second recycleur.

- Il est fortement recommandé d'avoir une pratique régulière (au moins 2 plongées par mois) pour assurer le maintien des acquis ;

- En cas d'arrêt prolongé de la pratique (durée supérieure à un mois), il est recommandé de définir une procédure de reprise d'activité accompagnée et une progressivité de reprise de profondeur.

APNEE

- Compte tenu de la spécificité de l'apnée, il est fortement recommandé de distinguer dans la réglementation, les modalités encadrant la pratique de l'apnée dans un cadre professionnel de celles encadrant les autres méthodes d'intervention mises en œuvre en hyperbarie professionnelle. La définition d'une mention spécifique à la pratique de l'apnée professionnelle associée à des techniques propres et un cursus de formation spécifique pourrait s'avérer pertinente.

- La pratique de l'apnée dans le cadre professionnel pourrait être envisagée sous réserve du respect strict des exigences sécuritaires suivantes :

  - Sur la zone d'intervention autorisée (0 à 20 mètres), il est fortement recommandé de différencier 2 tranches de profondeurs, auxquelles devront correspondre des niveaux de sécurité et de vigilance différents :
    - Tranche 1 : de 0 à 10 mètres
    - Tranche 2 : de 10 à 20 mètres

  - Au-delà de 20 mètres, il est fortement recommandé d'éviter des interventions en apnée sauf exception des enseignants encadrants, de dérogations ou de mesures spécifiques ;

  - Il est fortement recommandé de pratiquer la plongée en binôme et de visu :
    - Pour des profondeurs supérieures à 10 mètres, le binôme doit obligatoirement être dans l'eau pour assurer une surveillance visuelle permanente.

  - Pour des profondeurs de moins de 10 mètres, l'intervention d'un apnéiste seul peut se discuter, sous réserve de la mise en place d'une procédure spécifique, d'un dispositif d'alerte, d'un moyen de localisation et d'une flottabilité à proximité.

- Il est fortement recommandé d'adapter la profondeur d'intervention et la durée d'immersion journalière en fonction de la température. La durée maximale recommandée est de 5 heures. Elle est réduite à 3 heures lorsque la température de l'eau est inférieure à 12°C[8].

- Il est fortement recommandé :

  - De ne pas faire d'apnée dans les 12 heures qui suivent une intervention en milieu hyperbare avec paliers de décompressions ;
  - De planifier son intervention en fonction des tâches à effectuer, des caractéristiques du chantier, du matériel disponible et des spécificités environnementales ;
  - De réaliser un échauffement et une progressivité d'immersion ;
  - D'éviter toute hyperventilation prolongée (plus de 4 mouvements amples en 15 secondes) avant une intervention en apnée ;
  - D'éviter les apnées profondes à faible volume pulmonaire ;
  - De maîtriser la manœuvre de la carpe ;
  - De ne pas banaliser les contractions diaphragmatiques sur le fond ;
  - D'éviter les exercices à haute intensité lors de la remontée ;
  - De ne pas banaliser une syncope ou à défaut une samba ;
  - D'avoir des temps de récupération aussi long que les temps d'apnée ;
  - De s'hydrater pour compenser les pertes hydriques d'environ 300 millilitres par heure d'immersion ;
  - D'éviter de prendre de l'aspirine lors des périodes d'intervention en apnée ;
  - De considérer une apnée dans les 12 heures qui précèdent une intervention en milieu hyperbare comme une intervention en scaphandre autonome à part entière (profondeur maximum, durée de travail).

[8] Le choix des durées s'appuie sur l'appréciation des données scientifiques relatives à la perte de chaleur associée à la diminution de la température de l'eau et sur les retours d'expérience des pratiquants de l'apnée.

En termes d'actions de recherche et développement

- Assurer le suivi à long terme des travailleurs intervenant aux mélanges, en recycleurs ainsi que des apnéistes professionnels, afin d'acquérir des données complémentaires sur les effets sanitaires potentiels associés.

- Poursuivre le développement et la qualification d'algorithmes de décompression pouvant être adaptés en fonction des paramètres environnementaux des interventions et des caractéristiques individuelles des travailleurs.

Poursuivre la recherche concernant les systèmes d'analyse et de contrôle en particulier pour les recycleurs (amélioration des cellules oxygène, fiabilité des analyseurs de CO_2…).

6 Bibliographie

6.1 Publications

Adumitresi C, Ceamitru N, Ion I, Rãdulescu N, Farcaæ C, Ciufu C, Hanzu-Paza L (2009) Changes of glutathione peroxidase and reductase activities during acute experimental hyperbaric stress. Archives of the Balkan Medical Union 44(1): 15-19.

Aitken RJ, Buckingham D, Richardson D, Gardiner JC, Irvine DS (2000) Impact of a deep saturation dive on semen quality. International Journal of Andrology 23(2): 116-120.

Alves MMP, Fornari JV, Barnabé AS, Ferraz RRN, (2013) Evaluation of work security rules knowledge by large pipe workers. (Avaliação do conhecimento das normas de segurança no trabalho por trabalhadores em tubulões pressurizados). Rev Bras Med Trab 11(1):19-26.

Al-Waili NS, Butler GJ, Beale J, Abdullah MS, Finkelstein M, Merrow M, Rivera R, Petrillo R, Carrey Z, Lee B, Allen M (2006) Influences of Hyperbaric Oxygen on Blood Pressure, Heart Rate and Blood Glucose Levels in Patients with Diabetes Mellitus and Hypertension. Archives of Medical Research 37(8): 991-997.

Arieli R, Shochat T, Adir Y (2006) CNS toxicity in closed-circuit oxygen diving: symptoms reported from 2527 dives. Aviat Space Environ Med 77(5): 526-32.

Aviner B, Gnatek Y, Gradwohl G, Grossman Y (2010) Hyperbaric pressure effects on voltage-dependent Ca+2 channels: Relevance to HPNS. Undersea and Hyperbaric Medicine 37(5): 245-258.

Badier M (2006) Hypercapnie. In 'Physiologie et Médecine de la Plongée.' (Broussolle B, Méliet JL, Coulange M; Eds 2nd ed. Ellipses, Paris) pp. 306-312.

Barthélémy A (2006) Accidents barotraumatiques pulmonaires – Surpression pulmonaire. In 'Physiologie et Médecine de la Plongée.' (Broussolle B, Méliet JL, Coulange M; Eds 2nd ed. Ellipses, Paris) pp. 234-246.

Barthélémy A, Coulange M, Ranque S, Bergmann E, Sainty JM (2004) Barotraumatic pneumocephalus in scuba diver. In "Diving and Hyperbaric Medecine: Proceedings of the 30th Annual Scientific Meeting of the European Underwater and Baromedical Society"; 15 au 19 septembre 2004; Ajaccio, Corse, France. (Grandjean B et Meliet JL ; Eds EUBS 2004) pp. 63-67.

Barthelemy L, Chastel C, Belaud A (1980) Hyperbaric pressure effects ('Per se' hydrostatic pressure, nitrogen and helium partial pressure) on the multiplication of a picornavirus (Echo 11) in cell cultures. (Effets de pressions hyperbares (pression hydrostatique 'per se', pressions partielles d'azote et d'helium) sur la multiplication d'un picornavirus (echo 11) en culture cellulaire). Pathol Biol 28(3): 189-192.

Barthélémy L, Perrimond-Trouchet R. (1962) La surpression pulmonaire. Médecine, Education Physique et Sports 1:51-63.

Biersner RJ, Hall DA, Linaweaver PG (1976) 'Associations between psychological factors and pulmonary toxicity during intermittent oxygen breathing at 2 ATA.' Aviation Space and Environmental Medicine 47(2): 173-176.

Blatteau JE, Boussuges A, Hugon JM (2006) L'accident bullaire initial. In 'Physiologie et Médecine de la Plongée.' (Broussolle B, Méliet JL, Coulange M; Eds 2nd ed. Ellipses, Paris) pp. 385-393.

Blatteau JE, Souraud JB, Boussuges A (2006) Naissance des bulles : théories des noyaux gazeux. In 'Physiologie et Médecine de la Plongée.' (Broussolle B, Méliet JL, Coulange M; Eds 2nd ed. Ellipses, Paris,) pp. 359-384.

Broussolle B, Méliet JL, Coulange M (2006) 'Physiologie et Médecine de la Plongée'. Eds 2nd ed. Ellipses, Paris.

Buravkova LB, Popova YA (2007) Effects of various hyperbaric gas mixtures on metabolic parameters of human blood. Human Physiology 33(5): 603-613.

Burnet H, Reynaud-Gaubert M, Lucciano M, Jammes M (1992) Relationship between inspired and expired gas temperatures in a hyperbaric environment. Respiration Physiology 90(3): 377-386.

Butler BD, Katz J (1988) Vascular pressures and passage of gas emboli through the pulmonary circulation. Undersea Biomed Res 15: 203-209.

Calvert JW, Cahill J, Zhang JH (2007) Hyperbaric oxygen and cerebral physiology. Neurological Research 29(2): 132-141.

Cevik NG, Orhan N, Yilmaz CU, Arican N, Ahishali B, Kucuk M, Kaya M, Toklu AS (2013) The effects of hyperbaric air and hyperbaric oxygen on blood-brain barrier integrity in rats. Brain Research 1531: 113-121.

Chen SH, Chen RY, Xu XL, Xiao W-B (2012) Microarray analysis and phenotypic response of pseudomonas aeruginosa PAO1 under hyperbaric oxyhelium conditions. Canadian Journal of Microbiology 58(2): 158-169.

Chen SH, Chen RY, Chen HT, Xu XL, (2012) Multilocus sequence typing scheme of Pseudomonas aeruginosa isolates from naval divers. Academic Journal of Second Military Medical University 33(11): 1241-1244.

Cooper PD, Van Den Broek C, Smart DR (2009) Hyperbaric chamber attendant safety II: 14-Year health review of multiplace chamber attendants. Diving and Hyperbaric Medicine 39(2): 71-76.

Cooper PD, Van Den Broek C, Smart DR, Nishi RY, Eastman D (2009) Hyperbaric chamber attendant safety I: Doppler analysis of decompression stress in multiplace chamber attendants. Diving and Hyperbaric Medicine 39(2): 63-70.

Corriol JH (2006a) Accidents de décompression. In 'La plongée en apnée: physiologie, médecine & prévention.' (Corriol JH ; Eds 4ème ed. Elsevier Masson, Paris) pp. 130-140.

Corriol JH (2006b) Pertes de connaissance hypoxique. In 'La plongée en apnée: physiologie, médecine & prévention.' (Corriol JH ; Eds 4ème ed. Elsevier Masson, Paris) pp. 110-121.

Corriol JH (2006c) Respiration du nageur en surface. In 'La plongée en apnée: physiologie, médecine & prévention.' (Corriol JH ; Eds 4ème ed. Elsevier Masson, Paris) pp. 28-31.

Coulange M, Bayle O, Barthélémy A (2006) Ostéonécrose dysbarique. In 'Physiologie et Médecine de la Plongée.' (Broussolle B, Méliet JL, Coulange M; Eds 2nd ed. Ellipses, Paris) pp. 499-515.

Coulange M, Boussuges A, Barthélémy A, Sainty JM (2009) Accidents de la plongée sous-marine. In 'Réanimation Médicale' (CNERM ; Eds 2nd ed. Elsevier Masson, Paris) pp. 1671-1674.

Coulange M, Gourbeix JM, Grenaud JJ, D'Andrea C, Henckes A, Harms JD, Cochard G, Barthélémy A (2008) La RSE (remontée sur expiration) en 2008 : Bénéfices/Risques ? Analyse rétrospective des barotraumatismes thoraciques. Bull Medsubhyp 18:9-14.

Coulange M, Rossi P, Gargne O, Gole Y, Bessereau J, Regnard J, Jammes Y, Barthelemy A, Auffray JP, Boussuges A (2010) Pulmonary oedema in healthy SCUBA divers : new physiopathological pathways. Clin Physiol Funct Imag 30(3):181-6.

Courtière A. (2006) Toxicité de l'oxygène. In 'Physiologie et Médecine de la Plongée.' (Broussolle B, Méliet JL, Coulange M; Eds 2nd ed. Ellipses, Paris) pp. 271-281.

Craig AB, Dvorak M (1975) Expiratory reserve volume and vital capacity of the lungs during immersion in water. J Appl Physiol 38(1):5-9.

Dahlback G, Jonsson E, Liner M (1978) Influence of hydrostatic compression of the chest and intrathoracic blood pooling on static lung mechanics during head-out immersion. Undersea Biomed Res 5:71-85.

De Mojà, CA, Reitano M, De Marco P (1987) Anxiety, perceptual and motor skills in an underwater environment. Perceptual and Motor Skills 65(2): 359-365.

DeGorordo A, Vallejo-Manzur F, Chanin K, Varon J (2003) Diving emergencies. Resuscitation 59(2): 171-180.

Diehl RR, Linden D, Bünger B, Schäfer M, Berlit P (2000) Valsalva-induced syncope during apnea diving. Clin Auton Res 10(6):343-5.

Doolette DJ, Mitchell SJ (2011) Hyperbaric conditions. Comprehensive Physiology 1(1): 163-201.

Dzamonja G, Tank J, Heusser K, Palada L, Valic Z, Bakovic, Obad A, Ivancev V, Breskovic T, Diedrich A, Luft FC, Jordan J (2010) Glossopharyngeal insufflation induces cardioinhibitory syncope in apnea divers. Clin Auton Res 20(6): 381-4.

Evstropova, G. N. (1978) Effect of prolonged exposure to hyperbaric conditions on myocardial electrical activity at rest and during work. Bulletin of Experimental Biology and Medicine 84(9): 1223-1226.

Fahlman A, Kaveeshwar JA, Tikuisis P, Kayar SR (2000) Calorimetry and respirometry in guinea pigs in hydrox and heliox at 10-60 atm. Pflugers Archiv European Journal of Physiology 440(6): 843-851.

Farmery S, Sykes O (2012) Neurological oxygen toxicity. Emerg Med J; 29(10):851-2.

Ferrigno M (2004) Breath-hold diving. In “Diving Medicine” (Bove A, Davis J; Eds 4th edition. Saunders) pp. 77-93.

Filipova D (1999) Electromyographic activity of the respiratory muscles in hyperbaric conditions. Neuroscience and Behavioral Physiology 29(6): 639-644.

Flook V (2008) Off-gassing of volatile hydrocarbons in hyperbaric environments. Underwater Technology 28(2): 57-66.

Francis TJR, Denison DM (1999) Pulmonary barotrauma. In ‘The lung at depth’ (Lundgren CEG, Miller JN; Eds Taylor & Francis) pp. 295-374.

Francis J (2002) Decompression sickness. Emergency Medicine 14(4): 358-363.

Gabrielsen A, Johansen LB, Norsk P (1993) Central cardiovascular pressures during graded water immersion in humans. J Appl Physiol 75:581-585.

Germonpre P, Dendale P, Uunger P, Balestra C (1998) Patent foramen ovale and decompression in sports divers. J Appl Physiol 84:1622-6.

Gheyssens F (1998) Les accidents de plongée par surpression pulmonaire. A propos de 18 cas parvenus au centre hyperbare de l'hôpital Salvator à Marseille de 1991 à 1996 [Thèse]. Marseille, Faculté de Médecine.

Gole Y, Gargne O, Coulange M, Steinberg JG, Bouhaddi M, Jammes Y, Regnard J, Boussuges A (2011) Hyperoxia-induced alterations in cardiovascular function and autonomic control during return to normoxic breathing. Eur J Appl Physiol 111(6):937-46.

Guerrero F, Lucciano M, Joanny P, Jammes Y (1997) Hyperbaric-induced enhancement of noradrenaline-evoked contraction in rat thoracic aorta. Experimental Physiology 82(4): 687-695.

Hall J, Macdonald IA, Maddison PJ, O'Hare JP (1998) Cardiorespiratory responses to underwater treadmill walking in healthy females. Eur J Appl Physiol 77:278-284.

Hamilton RW (1989) Tolerating exposure to high oxygen levels: Repex and other methods. Marine Tech. Soc. J 23(4): 19-25.

Henckes A, Lion F, Cochard G, Arvieux J, Arvieux CC (2008) Pulmonary oedema in scuba-diving: frequency and seriousness about a series of 19 cases. Ann Fr Anesth Reanim 27(9):694-9.

Hong SK, Ting EY, Rahn H (1960) Lung volumes at different depths of submersion. J Appl Physiol 15:550-3.

Hopkins SR, Schoene RB, Henderson WR, Spragg RG, Martin TR, West JB. (1997) Intense exercise impairs the integrity of the pulmonary blood-gas barrier in elite athletes. Am J Respir Crit Care Med 155(3):1090-4.

Jammes Y, Giry P, Hyacinthe R (2006) Physiologie respiratoire et plongée. In 'Physiologie et Médecine de la Plongée.' (Broussolle B, Méliet JL, Coulange M; Eds 2nd ed. Ellipses, Paris) pp. 86-114.

Jammes Y, Burnet H, Cosson P, Lucciano M (1988) Bronchomotor response to cold air or helium-oxygen at normal and high ambient pressures. Undersea Biomed Res 15(3): 179-192.

Joulia F, Coulange M, Lemaitre F, Costalat G, Franceschi F, Gariboldi V *et al.* (2013) Plasma adenosine release is associated with bradycardia and transient loss of consciousness during experimental breath-hold diving. Int J Cardiol ; 168(5): 138-41.

Joulia F, Lemaître F, Jammes Y. (2006) Respiratory and metabolic aspects of apnoea. In 'Physiologie et Médecine de la Plongée.' (Broussolle B, Méliet JL, Coulange M; Eds 2nd ed. Ellipses, Paris) pp. 645-651.

Kiyan E, Aktas S, Toklu AS (2001) Hemoptysis provoked by voluntary diaphragmatic contractions in breath-hold divers. Chest 120(6): 2098-100.

Kurita A, Nagayoshi H, Okamoto Y, Takase B, Ishizuka T, Oiwa H (2002) Effects of severe hyperbaric pressure on autonomic nerve functions. Military Medicine 167(11): 934-938.

Lange L, Lange S, Echt M, Gauer OH (1974) Heart volume in relation to body posture and immersion in a thermoneutral bath. A roentgenometric study. Pflügers Arch 352: 219-226.

Le Guen H, Halbert C, Gras Le Guen C, Coulange M (2012) Serious pulmonary barotrauma in a child after first-time scuba dive. Arch Pediatr 19(7): 733-5.

Le Péchon JC (1996) Quels airs pour quels caissons ? Bulletin Medsubhyp 1996, 6 : 27-31.

Le Péchon JC (2010) Working Under Pressure. *In*: Comparative High Pressure Biology, P. Sébert (ed) Science Publishers Enfield USA., p 519-555.

Le Péchon JC (2013) Qualité des atmosphères hyperbares. Bulletin Medsubhyp 2013, 23 (supp) : 05-14.

Le Péchon JC et Gourdon G. (2010) Compressed-air work is entering the field of high pressures. Undersea Hyperb. Med. Vol7 n°37. p 165-170.

Le Péchon JC et Sterk W., (2001), Plongée à saturation dans la bentonite d'un tunnelier à 6,9 bars, Med. Sub. Hyp. Tome 11, n°1, pp. 7-12.

Le Péchon JC, Sterk W, Van Rees Vellinga TP, (2001) Saturation diving for tunnelling operations, Proceedings of AITES-IDA 2001 World Tunnel Congress, Milan, Italy 10-13 June 2001, Vol. II, pp. 285-292.

Li KC, Bao XC, Fang YQ, Ma J, Meng M, Chen HT, Li C (2011) Different activation of ERK1/2 and p38 with hyperbaric oxygen In dorsal root ganglion. Undersea and Hyperbaric Medicine 38(2): 149-153.

Liepmann ME (1981) Accommodative and convergence insufficiency after decompression sickness. Archives of Ophthalmology 99(3): 453-456.

Lillo, R. S., E. C. Parker, Porter WR (1997) Decompression comparison of helium and hydrogen in rats. Journal of Applied Physiology 82(3): 892-901.

Lin CD, Wei IH, Lai CH, Hsia TC, Kao MC, Tsai MH, Wu CH, (2011) Hyperbaric oxygen upregulates cochlear constitutive nitric oxide synthase. BMC Neuroscience 12(1): 21.

Lindholm P, Nyren S (2005) Studies on inspiratory and expiratory glossopharyngeal breathing in breath-hold divers employing magnetic resonance imaging and spirometry. Eur J Appl Physiol 94: 646-51.

Lund VE, Kentala E, Scheinin H, Lertola K, Klossner J, Aitasalo K, Sariola-Heinonen K, Jalonen J (2005) Effect of age and repeated hyperbaric oxygen treatments on vagal tone. Undersea and Hyperbaric Medicine 32(2): 111-119.

Lund V, Kentala E, Scheinin H, Klossner J, Koskinen P, Jalonen J (1999) Effect of hyperbaric conditions on plasma stress hormone levels and endothelin-1. Undersea and Hyperbaric Medicine 26(2): 87-92.

Malpieri M (2003) Barotrauma polmonare in apnea: fisiopatologia. In "Convegno interdisciplinare sulle scienze dell'apnea". Ustica, 4-5-6 Luglio.

Méliet JL (2006) La maladie de la décompression. In 'Physiologie et Médecine de la Plongée.' (Broussolle B, Méliet JL, Coulange M; Eds 2nd ed. Ellipses, Paris) pp. 404-410.

Mor A, Grossman Y (2006) Modulation of isolated N-methyl-D-aspartate receptor response under hyperbaric conditions. European Journal of Neuroscience 24(12): 3453-3462.

Mor A, Grossman Y (2010) The efficacy of physiological and pharmacological N-methyl-d-aspartate receptor block is greatly reduced under hyperbaric conditions. Neuroscience 169(1): 1-7.

Mor A., Levy S, Hollmann M, Grossman Y (2008) Differential effect of high pressure on NMDA receptor currents in Xenopus laevis oocytes. Diving and Hyperbaric Medicine 38(4): 194-196.

Mor A, Kuttner YY, Levy S, Mor M, Hollmann M, Grossman Y (2012) Pressure-selective modulation of NMDA receptor subtypes may reflect 3D structural differences. Frontiers in Cellular Neuroscience (September): 1-9.

Moro PJ, Coulange M, Brissy O, Cuisset T, Quilici J, Mouret JP, Bonnet JL, Barthélémy A (2011) Acute coronary syndrome and cerebral arterial gas embolism in a scuba diver. J C Case 3(1): 22-25.

Naidina VP, Pepelyaev YV, Buravkova LB (2009) Changes in the higher fatty acid composition of blood plasma and erythrocyte membranes during long exposure of a human to hyperbaric gas medium. Human Physiology 35(4): 442-448.

Nordahl SHG, Aasen T, Risberg J, Molvær OI (2003) Balance testing and Doppler monitoring during hyperbaric exposure. Aviation Space and Environmental Medicine 74(4): 320-325.

Normand JC, Baud JP, Bergeret A, Roullet C, Martin A, Prost G (1990) Holter monitoring of face workers, in a hyperbaric cutting chamber during construction of the Lyon's metro. (Enregistrements holter en milieu hyperbare, au niveau du front de taille du chantier du metro de Lyon). Archives des maladies professionnelles et de medecine du travail 51(5): 313-317.

Nuckols ML, Zumrick JL, Johnson CE (1983) Heat and water vapor transportation in the human upper airways at hyperbaric conditions. J Biomech Eng. 105(1): 24-30.

OPPBTP (2012) Pénibilité au travail comment agir ? Une édition commentée de l'accord de branche BTP du 20 décembre 2011, Ref 10 G0213.

Park KS, Choi JK, Park YS (1999) Cardiovascular regulation during water immersion. Appl Human Sci 18(6): 233-241.

Peachey J, Harrison MF, Stewart J, Kurtev A (2010) Changes in the standing potential of the eye under hyperbaric conditions. Comptes Rendus de L'Academie Bulgare des Sciences 63(3): 391-396.

Philp RB (1974) A review of blood changes associated with compression-decompression: relationship to decompression sickness. Undersea Biomed Res 1:117-43.

Polkinghorne PJ, Cross MR, Sehmi K, Minassian D, Bird AC (1988) Ocular fundus lesions in divers. Lancet 332(8625): 1381-1383.

Popova J, Buravkova L (2006) Blood biochemical parameters in women during long-term simulated hyperoxic diving up to 8 ATA. Undersea and Hyperbaric Medicine 33(3): 211-216.

Popova YA, Buravkova LB, Larina IM, Pavlov BN (2008) Effects of various hyperbaric gas mixtures on hormonal parameters of healthy human blood and saliva. Human Physiology 34(1): 103-113.

Ratzenhofer-Komenda B, Kovac H, *et al.* (1998) Quantification of the dermal vascular response to hyperbaric oxygen with laser-Doppler flowmetry. Undersea and Hyperbaric Medicine 25(4): 223-227.

Reinertsen RE, Flook V, Koteng S, Brubakk AO (1998) Effect of oxygen tension and rate of pressure reduction during decompression on central gas bubbles. Journal of Applied Physiology 84(1): 351-356.

Renon P, Jacquin M, Bruzzo M, Bizeau A (2006) Accidents barotraumatiques de l'oreille et des sinus. In 'Physiologie et Médecine de la Plongée.' (Broussolle B, Méliet JL, Coulange M; Eds 2nd ed. Ellipses, Paris) pp. 247-255.

Risch WD, Koubenec HJ, Beckman U, Lange S, Gauer OH (1978) The effect of graded immersion on heart volume, central venous pressure, pulmonary blood distribution, and heart rate in man. Pflügers Arch 374: 115-118.

Rostain JC, Balon N (2006) Diving: Barometric pressure and neurochemical mechanisms. La plongée: Pression barométrique et mécanismes neurochimiques 200(3): 257-263.

Sato T, Takeda Y, Hagioka S, Zhang S, Hirakawa M (2001) Changes in nitric oxide production and cerebral blood flow before development of hyperbaric oxygen-induced seizures in rats. Brain Research 918(1-2): 131-140.

Seki K, Hugon M (1977) Subjective fatigue and performance deterioration in saturation hyperbaric conditions. (Fatigue subjective et degradations de performance en environnement hyperbare a saturation) 20(2): 103-119.

Sonn J, Meirovithz E, Mayevsky A (2008) Hyperbaric hyperoxia and the brain in vivo: The balance between therapy and toxicity. Journal of Innovative Optical Health Sciences 1(2): 185-193.

Stirban A, Lentrodt S, Nandrean S, Pop A, Tschoepe D, Scherbaum WA (2009) Functional changes in microcirculation during hyperbaric and normobaric oxygen therapy. Undersea and Hyperbaric Medicine, 36(5): 381-390.

Taylor L, Midgley AW, Sandstrom ME, Chrismas B, McNaughton LR (2012) The effect of the hyperbaric environment on heat shock protein 72 expression in vivo. Research in Sports Medicine 20(2): 142-153.

Tikkinen J, Hirvonen A, Parkkola K, Siimes MA (2011) The effects of increased pressure, variation in inspired gases and the use of a mask during dry chamber dives on salivary cortisol in professional divers. Diving and Hyperbaric Medicine 41(4): 211-215.

Van Hulst RA, Klein J, Lachmann B (2003) Gas embolism: pathophysiology and treatment. Clin Physiol Funct Imaging 23(5): 237-246.

Vann RD, Butler FK, Mitchell SJ, Moon RE (2011) Decompression illness. The Lancet 377(9760): 153-164.

Veicsteinas A, Ferretti G, Rennie DW (1982) Superficial shell insulation in resting and exercising men in cold water. J Appl Physiol 52:1557-1564.

Vera-Cruz P, Zagalo C, Dos Santos JM, Aguas AP (2009) Chronic hyperbaric oxygen therapy causes only minor ultrastructural changes in the human nasal epithelium. European Journal of Anatomy 13(1): 7-10.

Vucetic M, Jensen PK, Jansen FC (2004) Diameter variations of retinal blood vessels during and after treatment with hyperbaric oxygen.' British Journal of Ophthalmology 88(6): 771-775.

Weibing X, Qingling Z, Lingsong P, Ruqing T (1998) Changes in human brainstem auditory evoked potentials during a 1,100 kPa He-O2 simulated saturation dive. Undersea and Hyperbaric Medicine 25(2): 111-114.

Weist F, Strobel G, Hölzl M, Böning D (2012) Arterial stress hormones during scuba diving with different breathing gases. Medicine and Science in Sports and Exercise 44(7): 1267-1274.

West JB, Mathieu-Costello O (1992) Stress failure of pulmonary capillaries: role in lung and heart disease. Lancet 340(8822):762-7.

Weston CFM, O'Hare JP, Evans JM, Corrall RJ (1987) Haemodynamic changes in man during immersion in water at different temperature. Clin Sci 73:613-616.

Wilmshurst PT, Nuri M, Crowther A, Webb-Peploe MM (1989) Cold-induced pulmonary oedema in scuba divers and swimmers and subsequent development of hypertension. The Lancet 333(8629): 62-65.

Wilmshurst PT (2004) Pulmonary oedema induced by emotional stress, by sexual intercourse, and by exertion in a cold environment in people without evidence of heart disease. Heart 90(7):806-807.

6.2 Normes

NF EN 13949 (novembre 2003) Appareils respiratoires – Appareils de plongée autonome à circuit ouvert utilisant du nitrox et de l'oxygène comprimé – Exigences, essais, marquage.

NF EN 14143 (août 2013) Appareils de protection respiratoire - Appareils de plongée autonome à recyclage de gaz - Équipement respiratoire.

NF EN 144-3 (novembre 2003) Appareils de protection respiratoire – Robinets de bouteille à gaz – Partie 3 : Raccords de sortie pour gaz de plongée Nitrox et oxygène.

NF EN 15333-1 (novembre 2011) Équipements respiratoires - Appareils de plongée narguilé à gaz comprimé et à circuit ouvert ; Partie 1 : Appareils à la demande.

NF EN 15333-2 (décembre 2011) Équipements respiratoires - Appareils de plongée narguilé à gaz comprimé et à circuit ouvert ; Partie 2 : Appareils à débit continu.

NF X 50-110 (mai 2003) Qualité en expertise – Prescriptions générales de compétence pour une expertise. AFNOR (indice de classement X 50-110).

6.3 Législation et réglementation

Arrêté du 15 mai 1992 définissant les procédures d'accès, de séjour, de sortie et d'organisationdu travail en milieu hyperbare. JO du 26 juin 1992.

Arrêté du 24 mars 2000 modifiant l'arrêté du 28 janvier 1991 définissant les modalités de formation à la sécurité des personnels intervenant dans des opérations hyperbares. JO n° 75 du 29 mars 2000 page 4863.

Arrêté du 28 Janvier 1991 définissant les modalités de formation à la sécurité des personnels intervenantdans des opérations hyperbares. NOR TEFT9103100A, JO du 2 mars 1991.

Arrêté du 30 octobre 2012 définissant les procédures d'accès, de séjour, de sortie et d'organisation du travail pour les interventions en milieu hyperbare exécutées avec immersion dans le cadre de la mention B « techniques, sciences et autres interventions ». NOR: ETST1229456A, ORF n°0266 du 15 novembre 2012 page 18067 texte n° 20.

Arrêté du 30 octobre 2012 relatif aux travaux subaquatiques effectués en milieu hyperbare (mention A). NOR: ETST1229420A, ORF n°0290 du 13 décembre 2012 page 19490 texte n° 32.

Décret n° 2011-45 du 11 janvier 2011 relatif à la protection des travailleurs intervenant en milieu hyperbare. NOR: ETST1023798D, JORF n°0010 du 13 janvier 2011 page 718 texte n° 21.

Décret n° 2012-135 du 30 janvier 2012 relatif à l'organisation de la médecine du travail. NOR: ETST1200303D, JORF n°0026 du 31 janvier 2012 page 1779 texte n° 36.

Décret n° 90-277 du 28 mars 1990 relatif à la protection des travailleurs intervenant en milieu hyperbare. NOR: TEFT9003290D, version consolidée au 14 juillet 2014.

Décret n° 93-40 du 11 janvier 1993 relatif aux prescriptions techniques applicables à l'utilisation des équipements de travail soumis à l'article L. 233-5-1 du code du travail, aux règles techniques applicables aux matériels d'occasion soumis à l'article L. 233-5 du même code et à la mise en conformité des équipements existants et modifiant le code du travail (deuxième partie : Décrets en Conseil d'Etat). NOR: TEFT9205574D, version consolidée au 13 janvier 1993.

Décret n° 96-364 du 30 avril 1996 relatif à la protection des travailleuses enceintes ou allaitant contre les risques résultant de leur exposition à des agents chimiques, biologiques et physiques et modifiant notamment le code du travail (deuxième partie : Décrets en Conseil d'Etat). NOR: TAST9610409D, JORF n°103 du 2 mai 1996 page 6613.

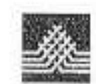
ANNEXES

Annexe 1 : Lettre de saisine



2013 -SA- 0 0 3 0

Ministère du travail, de l'emploi, de la formation professionnelle et du dialogue social



Direction générale du travail
DGT

Service des relations et des conditions de travail
SRCT

Sous-direction des conditions de travail, de la santé et de la sécurité au travail
CT

Bureau des risques chimiques, physiques et biologiques
CT 2

39-43, Quai André-Citroën
75902 Paris Cedex 15

Téléphone : 01 44 38 26 73
01 44 38 24 69

Télécopie : 01 44 38 26 48
Services d'informations du public :
Internet : www.travail.gouv.fr

Monsieur le Directeur général de l'Agence nationale de sécurité sanitaire de l'alimentation, de l'environnement et du travail
27-31 avenue du Général Leclerc
94701 Maisons-Alfort cedex

Paris, 07 JAN. 2013

Affaire suivie par : Viviane Le Sourd-Thébaud/Thierry Lahaye
Tél : 01 44 38 26 92/29 79
Mél : viviane.le-sourd-thebaud@dgt.travail.gouv.fr

Objet : Demande d'appui scientifique et technique concernant les risques sanitaires liés aux expositions professionnelles de mélanges gazeux respiratoires autres que l'air dans le cadre des activités hyperbares.

Monsieur le Directeur général,

Le décret n° 2011-45 du 11 janvier 2011 relatif à la protection des travailleurs intervenant en milieu hyperbare, ainsi que ses arrêtés d'application (en cours de rédaction), couvrent des secteurs d'activité très divers :

- En milieu immergé : travailleurs réalisant des ouvrages de génie civil, archéologues, cinéastes, chercheurs, …
- En milieu sec : secteur médical, tunneliers.

Ces textes organisent l'utilisation de gaz et mélanges gazeux respiratoires, notamment les mélanges dits « binaires » et « ternaires ».

Ils réglementent également les conditions d'utilisation des équipements (narguilé, scaphandre autonome, système à saturation ou appareil à recyclage de gaz appelés « recycleurs »), les modalités de décompression (tables, ordinateurs de plongée…), les profondeurs à partir desquelles doivent être utilisés ces gaz.

Les travaux de rédaction des premiers arrêtés d'application ont mis en lumière des interrogations sur les conditions garantissant un travail hyperbare en sécurité.

Dans ce cadre, nous vous demandons :

1) D'identifier et de caractériser les populations concernées par les activités hyperbares et exposées à **des mélanges gazeux respiratoires autres que l'air** ainsi que les conditions d'utilisation de ces mélanges et matériels, dans chacun des secteurs concernés (travaux, loisirs, archéologie, recherche…) ;

G:\-SRCT\CT2\8.PHYS\A.HYPERBAR\3.Outils\ANSES\projet_saisine_hyperbare_ANSES_juillet 2012.doc

2) De définir les conséquences sanitaires à court et long termes de l'usage des mélanges gazeux et matériels sur l'organisme (déperdition calorifique, fatigue, narcose...) et le bénéfice qu'ils apportent aux travailleurs. Une attention particulière est demandée sur les risques sanitaires liés à l'utilisation de la technique de recyclage d'air (les recycleurs) ;

3) Plus particulièrement pour l'apnée, d'évaluer l'accidentologie liée à cette pratique, les conséquences physiologiques associées et les recommandations pertinentes.

Je vous remercie de bien vouloir me remettre votre rapport pour la fin du 4e trimestre 2013.

Je vous prie de croire, Monsieur le Directeur général, à l'assurance de ma considération distinguée.

Le directeur général du travail

Jean-Denis COMBREXELLE

Annexe 2 : Questionnaire de préparation des entretiens (auditions et enquêtes)

Nom et qualité de la personne enquêtée :

Représentant l'organisme :

Expert indépendant :

→Pour la suite du questionnaire, le terme « travailleurs hyperbares » désigne suivant le secteur d'activité considéré, les travailleurs intervenant en conditions hyperbares (plongeurs, tubistes, hyperbaristes médicaux…)

Thèmes abordés	**Réponses obtenues**			
Nombre	**A**	**B**	**C**	**D**
Classe **Mention des « travailleurs hyperbares »**	**0** **1** **2** **3**	**0** **1** **2** **3**	**0** **1** **2** **3**	**0** **1** **2** **3**
Age moyen des « travailleurs hyperbares » **Nb de « travailleurs hyperbares »** **Nb moyen d'interventions annuelles/ « travailleur hyperbare »** **Nb moyen d'interventions totales/ « travailleur hyperbare »** **Nb moyen d'années de travail hyperbare / « travailleur hyperbare »**				

TECHNIQUES D'INTERVENTION EN CONDITIONS HYPERBARES						
	Caisson hospitalier, sas de tunnelier pour air comprimé + mélange	Scuba + mélange	Narguilé + mélange	Recycleur	Système + mélange	Apnée
1) Nb de personnes concernées						
2) Type de matériel utilisé **Pour le recycleur : *La norme européenne NF EN 14143 vous parait-elle suffisante ? Applicable ? Adaptée ?*** **Pour les sas de tunneliers : *La norme Européenne EN 12110 vous semble-t- bien adaptée ?*** **Pour les caissons hospitaliers *: Que pensez-vous de la norme qui définit le matériel médical avec idée de protéger les patients, mais pas nécessairement le personnel co-exposé ?***						
3) Maintenance du matériel[9] **Qui ?**						

[9] *Matériel impliqué dans le dispositif permettant la respiration en conditions hyperbares y compris les équipements lourds (Caisson de recompression d'urgence de chantier, caissons hospitaliers, systèmes de plongée profonde, sas de tunneliers)*

Durée de vie d'un appareil ? **ré-épreuve ?** (pour les bouteilles, réservoirs) **Contrôle annuel des EPI ?** (casques, détendeurs, bouteilles, robinetteries…) **Modalités - traçabilité – Prophylaxie**						
Problème de matériel à signaler ?						
4) Description de l'activité/du type de chantier **Equipe minimale sur le site (pour encadrer les interventions)** **Rôles et fonctions** **- en situation normale** **- en situation dégradée** **- en situation de secours**						
5) Conditions d'utilisation **-Fréquence d'utilisation** **- Nature du milieu** **- Profondeur/Pression moyenne et maximale** **- Durée d'intervention** **→Pour l'apnée : nb d'immersion / heure**						
Avantages de la mise en œuvre des techniques mentionnées						

Limites						
6) Formation (personnes et matériel) **-Durée** **- Contenu** **- Objectif** **- Pré-requis**						
7) Remise à niveau des connaissances sur l'utilisation des matériels (entretien, maintenance, réparation, etc.) **- Modalités** **- Périodicité** **- Traçabilité des parcours**						

	OXYGENE	AIR	NITROX	TRIMIX	HELIOX
NATURE DES GAZ UTILISES **Pourcentage** *(proportions respectives des différents gaz au sein d'un mélange gazeux)* **Pressions partielles**					
Nb de personnes concernées **- pour la France** **- par opération** **- par chantier** **- par année** **- autre *(à définir au moment de l'enquête)***					
Mode de fabrication et modalités d'analyse des gaz : **-avant l'exposition** **-pendant l'exposition** **-après l'exposition** **+ traçabilité**					
Type de tables de décompression/ Ordinateurs utilisés					
Avantages sur le plan technique, sur le plan sanitaire, par rapport à l'air					
Limites					
Intervention incompatible avec le mélange mentionné					

EFFETS SANITAIRES RECENSES LIES A L'EXPOSITION DES TRAVAILLEURS AUX CONDITIONS HYPERBARES / ACCIDENTOLOGIE					
<u>1) Définition de(s) l'effet(s) rapporté(s)</u> **a) Type(s) :** **- Accident barotraumatique** **- Accident de décompression** **- Accident biochimique** **- Autres…** **b) Nombre, incidence** **c) Circonstances de survenue (accidents EN plongée[10] /accidents DE plongée[11])** **<u>2) Cause de l'accident</u>** **- Erreur de procédure (décompression trop rapide, panique…), matériel défectueux…** **- Existence de facteurs favorisants ? (fatigue, plongées successives…)** **<u>3) Gravité</u>** **Reprise sans séquelle**					

10 *Les accidents EN plongée sont liés au fait que le plongeur se retrouve en milieu hostile (problème médical non lié directement avec la respiration de gaz sous pression de type coma diabétique, infarctus du moycarde, avec le risque principal qu'est la noyade.*

11 *Les accidents DE plongée sont liés au fait que l'on respire des gaz sous pression et dans un environnement aquatique de type barotraumatisme, biochimique, de désaturation (danger également faune et flore)*

Reprise avec séquelle (précisez) **Ajustement du poste** **Reclassement** **Inaptitude définitive IMH** **Décès** **4) Prise en charge de l'accident** **Qualité/rapidité des soins administrés**					
5) Suites de l'accident **- Suivi médical spécifique ?** **- Contre-indication médicale spécifique ?**					
Préconisation pour améliorer la sécurité des travailleurs en milieu hyperbare avec ce type de mélange					

Observations :

Annexe 3 : Comptes-rendus des auditions

Les comptes-rendus sont classés par ordre alphabétique suivant la liste ci-dessous :

- BF Systèmes - le 18 novembre 2013 ;
- Cephismer - Cellule plongée humaine et intervention sous la mer - le 18 novembre 2013 ;
- CNRS - Centre national de la recherche scientifique / IMBE - Institut Méditerranéen de Biodiversité et d'Ecologie marine et continentale - le 27 novembre 2013 ;
- COMEX - Compagnie maritime d'expertise - le 27 novembre 2013 ;
- DRASSM - Département des recherches archéologiques subaquatiques et sous-marines - Plongée scientifique/Archéologie sous-marine et subaquatique - le 28 novembre 2013 ;
- FSGT - Fédération sportive gymnique du travail / Hippoconsulting - le 27 novembre 2013 ;
- IFREMER - Institut français de recherche pour l'exploitation de la mer (Laboratoire Environnement Ressources Provence-Azur-Corse) - le 28 novembre 2013 ;
- INPP - Institut national de la plongée professionnelle - le 28 novembre 2013 ;
- IRD - Institut de recherche pour le développement - le 28 novembre 2013 ;
- Jean-Claude Le Péchon - les 29 novembre et 19 décembre 2013 ;
- OPPBTP - Organisme professionnel de prévention du bâtiment et des travaux publics - le 25 novembre 2013 ;
- Sécurité civile (sapeurs-pompiers) - Ecole d'application de sécurité civile (ECASC) - le 27 novembre 2013 ;
- Service de santé des armées - le 18 novembre 2013 (Hôpital d'Instruction des armées Sainte-Anne à Toulon) et le 29 novembre 2013 (Hôpital d'Instruction des armées du Val-de-Grâce à Paris) ;
- SNETI - Syndicat national des entrepreneurs de travaux immergés – le 28 novembre 2013 ;

BF Systèmes – Entreprise de services, spécialiste du domaine hyperbare

M. Axel BARBAUD – Ingénieur de l'Ecole Navale, Président de BF Systèmes

M. Julien HUGON – Ingénieur de recherche, Chef du département Modélisation et Analyse

Date de l'audition : 18/11/2013

Lieu de l'audition : Toulon

Axel Barbaud, le Président de BF SYSTEMES est officier de marine. Il est ingénieur de l'Ecole navale et a exercé des responsabilités de haut niveau dans le domaine de la plongée militaire avant de fonder BF SYSTEMES, une entreprise de services, spécialiste du domaine hyperbare.

BF SYSTEMES dirige depuis 2010 un programme de recherche pluridisciplinaire ayant deux objets : le développement de connaissances et de méthodes d'analyses spécialisées dédiées à la prévention des accidents de décompression ; le développement d'une instrumentation portative dédiée à la mesure et à la traçabilité des effets de la décompression sur les plongeurs. Cette dynamique rassemble une quinzaine d'experts dont l'Institut Langevin (ESPCI ParisTech / INSERM) un laboratoire de recherche du CNRS ainsi que le LNE.

L'entreprise propose ses services de façon transverse sur l'ensemble des secteurs d'activités du domaine hyperbare : la plongée commerciale, le BTP (tunneliers), la plongée de loisir, l'espace, la défense et la médecine hyperbare. Elle met en œuvre un programme complet destiné à contrôler et améliorer les performances en sécurité de groupes industriels vis-à-vis des risques associés aux expositions hyperbares. Dans ce cadre, elle accompagne en Europe et aux Etats-Unis des groupes industriels et des grands comptes qui mettent en œuvre des intervenants hyperbares.

BF SYSTEMES compte parmi ses membres des managers de groupes industriels, des médecins spécialistes en physiologie des expositions hyperbares et des ingénieurs issus de l'industrie spatiale, de l'industrie biomédicale et du domaine informatique.

Le Dr. Julien Hugon est chef du département "Analyse de risque et modélisation de la décompression" au sein de BF SYSTEMES. Il a travaillé plus de dix ans dans l'industrie spatiale en tant que responsable de plusieurs projets de recherches relatifs aux échanges thermiques et gazeux sur des plateformes satellites. Il est spécialiste de l'analyse des risques (effets de courts et de longs termes) associés aux expositions aux environnements hyperbares. Il est l'auteur d'une thèse de doctorat ("Vers une modélisation biophysique de la décompression") et de nombreuses publications relatives à cette question.

Les accidents de décompression

Les statistiques générales dans l'industrie à une échelle internationale décrivent entre 1 et 4 accidents de décompression (ADD) pour 10 000 plongées. Les ADD ont une double particularité :

- ils représentent la première cause des accidents en plongée sous-marine et figurent aussi parmi les accidents les plus graves ;

- ils surviennent en dépit du respect de procédures de plongée à la fois réglementaires et obligatoires (paliers de décompression).

Contexte scientifique des activités de BF SYSTEMES

Dans les années 1990, des scientifiques de la marine Canadienne ont suivi le taux de survenue d'accidents de désaturation au sein d'une population dont ils avaient préalablement déterminé le niveau de bulles à l'aide d'un appareil doppler (les niveaux de bulles entendus sont classifiés de 0 à 4 pour chaque plongeur). Ces chercheurs ont observé que lorsque les plongeurs présentaient

des niveaux de bulles élevés, il y avait statistiquement un risque augmenté de survenue d'accidents* (observation valide à l'échelle d'une population et non à l'échelle individuelle).

Réf : Thesis " The relationship between intravascular doppler detected gas bubbles and decompression sickness after bounce diving in humans" K.D. Sawatsky (MD) - Graduate Program in Exercise and Sport Science, York University, Toronto, Ontario (1991).

Cette analyse qui avait porté sur plus de 3200 plongées réalisées au centre hyperbare de la marine canadienne entre les années 1980 et 1991 est poursuivie aujourd'hui par BF SYSTEMES (période 1991 - 2014) dans le cadre d'un contrat de collaboration de recherche passé avec la Défense Canadienne.

Plus généralement, ces informations ainsi que les informations statistiques rassemblées par BF SYSTEMES dans le cadre de ses activités de service ont servi de support au développement d'outils d'analyse et d'estimation de risque très spécialisés.

Objectifs de la société

L'objectif de BF Systèmes est, via le suivi des plongeurs sur le terrain, de ramener les procédures dans des zones où elles ne génèrent pas ou moins de bulles afin d'améliorer la sécurité des plongeurs. A cet effet, une technologie de détection des niveaux de bulles via le monitoring des plongeurs a été développée et validée.

Les enjeux sont de diminuer le nombre d'accidents et de contrôler voir, le cas échéant, réduire le niveau de stress physiologique que subissent les plongeurs.

Outre cette technologie, BF SYSTEMES a développé un modèle d'analyse de risque. Il comprend un simulateur de débit de bulles, ayant la capacité de se calibrer sur des données physiologiques réelles observées sur le terrain et offrant la possibilité de personnaliser les procédures en fonction de paramètres réellement observés.

Ce modèle mathématique a été développé suite à l'analyse de l'ensemble des modèles de décompression publiés, dans l'objectif de constituer un modèle nouveau, qui synthétise tout ce qui se fait de mieux et en y associant une composante de mesures de données physiologiques réelles. Il s'agit du modèle BORA (Bubble Occurrence Risk Assessment). Il fait intervenir de nombreux paramètres individuels : condition physique, âge, entraînement, dispositions physiologiques particulières propres à l'individu (FOP)…

L'UHMS (Undersea and Hyperbaric Medical Society) recommande une méthodologie de principe pour faire évoluer une table de décompression. La démarche mise en œuvre par BF Systèmes s'inscrit entièrement selon ces principes.

TABLES DE DECOMPRESSIONS ET ORDINATEURS DE PLONGEE (discussion autour de cette question):

D'après Julien Hugon, en plongée professionnelle, peu de personnes utilisent des ordinateurs. Ces utilisations concernent plutôt la plongée loisirs, incluant la plongée aux mélanges en circuit ouvert et en recycleurs fermés et semi-fermés. Il n'est pas démontré qu'un ordinateur de plongée apporte plus ou moins de sécurité qu'une table. Il semble qu'il ne soit pas plus risqué de plonger avec un ordinateur, du moins dans le domaine professionnel. Le risque relève davantage de la procédure contenue dans l'ordinateur (algorithme de décompression) que de l'ordinateur en tant que tel.

- Dans quel cadre les ordinateurs de plongée pourraient être utilisés en plongée professionnelle ?

Pour Axel Barbaud, si l'on s'intéresse aux militaires et aux plongeurs industriels (de plateformes pétrolières par exemple) qui ont des profils de plongées dits « carrés », l'ordinateur de plongée

représente un intérêt dans sa fonction d'enregistrement et de traçabilité des paramètres exacts d'une plongée (vitesse de descente, durée et profondeur atteinte, vitesse de remontée) à des fins d'analyse à posteriori ainsi que dans des fonctions d'aide ou d'assistance possible à la procédure.

Axel Barbaud explique que pour les plongeurs scientifiques, les archéologues, les spéléologues qui font de la plongée multi-niveaux, l'utilisation de l'ordinateur - et plus exactement l'algorithme de décompression qui est utilisé - présente un intérêt évident puisqu'il autorise en pratique de s'affranchir des contraintes de la plongée carrée (profondeur maximum et durée maximum de plongée). Reste bien entendu entière la question de la validation et de la qualification de ces algorithmes.

D'après Julien Hugon, les ordinateurs de plongée sont basés sur des algorithmes relativement proches qui fournissent des procédures de remontée assez similaires.

Mathieu Coulange s'interroge sur la pratique du palier à mi-profondeur et sur les retours que BF-systèmes a pu avoir dessus. Il explique que le problème lié à l'utilisation d'algorithmes « innovants » proposant des paliers plus profonds se pose principalement dans le cadre de la pratique de la plongée loisirs, car la vitesse de remontée est déjà trop lente donc il n'est pas sécuritaire d'augmenter encore la profondeur. En revanche, ce type de pratique pourrait tout à fait convenir dans le cadre de la plongée professionnelle.

Pour les incursions profondes relativement courtes, Julien Hugon explique que le fait d'introduire du palier plus profond quitte à rallonger la décompression sur la fin, serait du bon sens mais cela équivaut à remonter plus lentement qu'auparavant.

Mathieu Coulange précise que pour une même plongée profonde, l'utilisation de 5 ordinateurs de plongée différents peut donner des profils de décompression significativement différents, d'autant plus en cas de plongées successives.

Christophe Peny s'interroge sur l'existence d'organismes habilités à valider les ordinateurs de plongée. Des normes existent pour la fabrication des matériels de plongée, mais qu'en est-il pour la validation des matériels responsables de la décompression ?

Axel Barbaud précise qu'une norme « mécanique » existe pour ce type d'appareils (prouver qu'il ne va pas exploser, imploser…) mais rien sur l'algorithme et la décompression en tant que tels.

Christophe Peny suggère la nécessité dans l'avenir de mettre en place une entité nationale qui ferait autorité sur le contrôle, la validation des matériels de décompression qui sont mis sur le marché. Comme cela est déjà pratiqué dans la marine par exemple, il serait intéressant de définir au moment de la conception d'un matériel de décompression quelle réponse physiologique (mesure de bulles…) a été observée pour un algorithme donné, sur un échantillon de population donné.

Julien Hugon souligne que la définition des plans d'essais à mettre en place pour qualifier et valider un dispositif de ce type est relativement complexe (profondeurs multiples, multiplicité des gaz utilisés…).

Afin de tendre vers un tel objectif, Axel Barbaud évoque la nécessité de mettre en place une analyse systémique qui est fondée sur un recueil d'information auprès d'une population pilote. L'information recueillie doit être spécifique, segmentée et systématisée.

- Quel outil fournir aux professionnels qui vont plonger multi niveaux avec recycleurs et ordinateurs ?

La plongée professionnelle à l'air utilise la table MT. Par exemple, les biologistes à l'air plongent encore aux tables MT dans les grosses structures, mais ailleurs la plupart plongent à l'ordinateur.

Mathieu Coulange explique que le vrai enjeu est de faire un ordinateur qui intègre les tables MT. En effet, les professionnels des secteurs de l'archéologie, les plongeurs scientifiques, les cinéastes… évoluent à des niveaux différents d'où leur besoin de bénéficier d'ordinateurs de plongée qui recalculent en temps réel la meilleure désaturation (toujours sur la base d'un

algorithme qui a généré une table). Beaucoup d'ordinateurs ne sont par ailleurs pas conçus pour faire des plongées yo-yo.

Le monitoring du niveau de bulles circulantes est pour Mathieu Coulange insuffisant pour rendre compte des « risques » encouru par le plongeur. Les bulles circulantes traduisent le stress d'un individu et il s'agirait plutôt d'un paramètre à mesurer parmi d'autres. Il faudrait développer une banque de données qui recense à grande échelle le niveau de bulles mesuré chez les plongeurs pour voir réellement s'il s'agit d'un facteur prépondérant.

En revanche, pour mieux appréhender la question, il faudrait utiliser des outils d'analyse prospective permettant 1) le ciblage des populations témoins via le développement d'un outil de saisie de plongée qui renseigne des paramètres clés/pertinents (le DAN (Divers Alert Network) a mis en place ce type d'outil mais il est très imparfait et des données recensées manquent d'homogénéité) et 2) un outil permettant de faire un screening sur le long terme et de comprendre quels facteurs sont prépondérants sur le déclenchement d'accidents.

Axel Barbaud : les tables MT sont des procédures carrées et l'intérêt pour cette population est de disposer de procédures multi-niveaux. L'enjeu est de parvenir à la qualification d'un algorithme de décompression respectueux de la santé de des plongeurs. Les lacunes pointées parmi les outils précités illustre la nécessité d'un recueil d'informations standardisé et systématisé à l'échelle d'une population pilote.

La question du développement et de la qualification de procédures adaptées à un contexte et à un environnement donnés se pose de façon transverse pour l'ensemble des activités hyperbares. BF SYSTEMES observe cet état de fait dans le cadre de ses échanges professionnels avec l'ensemble des acteurs concernés par ce sujet, dont par exemple le NIOSH et l'ADCI aux Etats-Unis, le CETU (Centre d'études des tunneliers) qui est une structure française basée à Lyon spécialisée dans la sécurité en général concernant toutes les interventions en tunneliers, dont le risque hyperbare, l'IMCA en Europe pour l'industrie parapétrolière. BF SYSTEMES en a précisément fait son cœur de métier.

CEPHISMER - Cellule plongée humaine et intervention sous la mer

M. Jord LUCAS – Commandant de la Cephismer, porte parole interarmées
Date de l'audition : 18/11/2013
Lieu de l'audition : Toulon

POPULATION PROFESSIONNELLE

1) Effectifs tous métiers confondus :

Le nombre de travailleurs hyperbares répartis entre les 3 armées (terre, air et marine) et la gendarmerie représente environ **2 000 plongeurs**.

2) Métiers représentés et répartition des effectifs :

Défense :

- **Mention B**, classe 1 (jusqu'à 30 m) : **1400 plongeurs de bord (PLB**) [3 armées+ gendarmerie]
- **Mention B**, classe 2 : **100 nageurs de combat (NC)** + 2**00 plongeurs de combat du génie (PCG)**
- **Mention B**, classe 3 : **300 plongeurs démineurs (PLD)**

Exceptions :

- **Mention C**, classe 2 : 4 sous-mariniers formés au Nato Submarine Rescue System (NSRS).
- **Mention A**, classe 2 : 35 spécialistes de génie sous-marin

Les métiers de santé militaires, infirmiers et médecins (mention C2 et C3) ne sont pas abordés ici, ils seront explicités lors de l'audition de Michel Hugon du Service de Santé des armées.

3) Description des métiers et activités représentés :

Les plongeurs de bord (PLB) : 3 armées + gendarmerie

Définition de la population

Il s'agit d'une compétence plongée de base, acquise via une formation, en complément d'une autre fonction (type mécanicien par exemple), ce n'est pas un métier propre. C'est un 1er niveau avant de passer sur postes plus spécialisés (NC-PCG-PLD).

Il s'agit d'une population qui va plonger en moyenne une dizaine d'années avant de se diriger vers d'autres fonctions (abandonne souvent le terrain), cette population reste donc très jeune (pas plus de 40 ans).

Matériel/gaz utilisés pour la plongée

Les PLB plongent à l'air jusqu'à 40 mètres.

Formation

- Durée : 5 semaines
- Objectif : 35 mètres à l'air
- Prérequis : aucun, sélection sur l'aquaticité

Les nageurs de combat (NC)

Définition de la population

Population professionnelle dont la plongée est le cœur de métier toute l'année, toute leur carrière.

Matériel/gaz utilisés pour la plongée

Les NC plongent à l'O2 pur au recycleur en circuit fermé

Formation

- Durée : 7 mois
- Contenu : 1) apprendre à plonger avec le matériel, puis 2) à travailler avec le matériel
- Objectif : Oxygène pur au recycleur en circuit fermé
- Prérequis : PLB

Les plongeurs de combat du génie (PCG)

Définition de la population

Population professionnelle dont la plongée est le cœur de métier toute l'année, toute leur carrière.

Matériel/gaz utilisés pour la plongée

Dans l'armée de terre, les PCG plongent à l'O2 pur au recycleur en circuit fermé.

Formation

- Durée : 5 semaines
- Objectif : Oxygène pur au recycleur en circuit fermé (maitrise de l'appareil)
- Prérequis : PLB

Les plongeurs démineurs (PLD)

Définition de la population

Population professionnelle dont la plongée est le cœur de métier toute l'année, toute leur carrière.

Matériel/gaz utilisés pour la plongée

Dans la marine, les PLD plongent au recycleur semi-fermé, jusqu'à des profondeurs de 80 m, en utilisant différents mélanges dont les 2 principaux sont le Nitrox ou le Trimix.

Formation

- Durée : 10 mois
- Objectif : Nitrox/Trimix jusqu'à 80 mètres + déminage
- Prérequis : PLB

Les sous-mariniers formés au Nato Submarine Rescue System (NSRS),

Un dispositif européen de sauvetage de sous-marin. Il s'agit de personnels sous-mariniers (ce ne sont pas des plongeurs) qui reçoivent notamment une formation aux interventions en caisson hyperbare. Dans le cadre du sauvetage sous-marin, formation de personnel pas aux actes médicaux mais pour accompagner les interventions en caisson hyperbare). En cours de formation (4) mais à terme, environ 10 personnes.

Les spécialistes du génie sous-marin (SPEGENISM)

Plongeurs démineurs qui ont une formation supplémentaire dans le génie sous-marin

4) Profil des populations de plongeurs militaires :

L'âge moyen des travailleurs hyperbares de cette population est très jeune avec une moyenne qui se situe entre 30 et 35 ans et des extrêmes allant de 18 à 55 ans.

La fréquence moyenne des interventions annuelles en conditions hyperbares par plongeur représente environ 80 plongées par plongeur par an (plutôt 100 pour les PLD). En moyenne, un PLB va plonger entre 8 et 10 ans et un PLD ou un NC pendant environ 20 ans (extrême à 35 ans).

Le nombre moyen d'interventions totales sur l'ensemble d'une carrière représente donc environ 500 plongées pour les PLB (à raison de 80 plongées par an réparties sur 8 ans) et autour de 2000 plongées pour les PLD et NC (une centaine de plongées par an pendant environ 20 ans).

TECHNIQUES D'INTERVENTION EN CONDITIONS HYPERBARES

1) Techniques utilisées et effectifs concernés

Caissons de chantier :

La marine dispose de 20-25 caissons dont l'utilisation concerne les PLD (environ 300 plongeurs capables de mettre en œuvre ce type de caissons sous couvert d'un médecin et/ou un infirmier). Ils fonctionnent à l'Air/oxy ou aux mélanges.

Peu de caissons sont disponibles dans les autres armées. Le marin, de par son activité est amené à partir loin, en zones isolées d'où la nécessité de disposer de caissons sur site (en comparaison avec les autres armées).

Scuba + mélange :

L'ensemble des plongeurs (2000 personnes) sont concernés par l'utilisation de cette technique.

Narguilé + mélange :

Les PLD (300 plongeurs) l'utilisent dans le cadre de travaux sous-marins légers. Il s'agit d'une activité spécifique (tout le monde formé, mais pas de pratique de tous au quotidien). Génie de combat rapide.

Recycleur militaire :

Les plongeurs de la marine plongent aux recycleurs et aux mélanges depuis les années 50. Parmi les appareils à recyclage de gaz utilisés, 3 sont à circuit fermé et 4 semi-fermé.

Sont concernés par cette technique les PLG + NC + PLD (environ 600 plongeurs). Cette pratique représente environ 60 000 plongées par an.

Système + mélange :

Tous les personnels amenés à utiliser cette technique sont formés à Saint-Mandrier (3 armées confondues).

Dans la marine, cette pratique concerne uniquement la Cephismer où 20 plongeurs d'essais sont formés à faire ce type de plongée.

Apnée

Dans la marine, l'apnée est pratiquée uniquement dans un processus de sélection et de formation des candidats. Il n'y a aucune perspective d'application opérationnelle de cette technique pour les militaires.

En formation, les PLB s'exercent à l'apnée statique à 6 mètres– 9 mètres– 12 mètres et font également des exercices en apnée dynamique (l'élève apprend à tenir 30 secondes à 1 minute sans l'embout en bouche). La formation des PLD comprend des apnées jusqu'à des profondeurs de 18 mètres.

Cette pratique est intéressante pour étudier l'aquaticité des candidats (aspect sélectif) mais également pour leur faire comprendre que la perte du détendeur laisse un peu de temps avant de manquer d'air (aspect pédagogique).

2) Utilisation du recycleur

Applicabilité de la norme européenne NF EN 14143 :

La norme européenne NF EN 14143 n'est pas complètement applicable au secteur de la défense, notamment sur l'aspect pression partielle d'O2 (PPO2). La limite très basse imposée par la norme est dépassée par les militaires lors de plongées à l'O2 pur et lors des plongées au Trimix avec paliers à l'oxygène assez profonds.

D'après la norme, la PPO2 maximum est de 1.4 bars en plongée et de 1.6 bars en paliers. Dans la pratique, les militaires vont en plongée jusqu'à une PPO2 de 1.7 bars à l'O2 pur et jusqu'à 2 bars en mélange (plongées de 20 min maximum ou incursions nageurs de 3 min à 18 mètres par exemple). Ils peuvent également atteindre une PPO2 de 2.2 bars en paliers.

La pratique des militaires sort du cadre du décret, mais plusieurs paramètres permettent de garantir la sécurité des plongeurs notamment l'expérience des militaires qui pratiquent depuis 50 ans la plongée aux mélanges associée aux processus de sélection du personnel mis en place (aptitude et détection précoce des hypersensibilités à l'hyperoxie).

Plusieurs stratégies de protection sont également mises en œuvre :

- L'utilisation de sangles d'embout et de couvres-lèvres qui permettent de garder le détendeur en bouche en toutes circonstances (notamment en cas de perte de connaissance) ;
- La plongée systématique en binôme
- La plongée sanglée (sangle de 2-3 à 6 mètres) systématique en cas de plongée aux mélanges (recycleur) qui permet d'être en lien permanent avec son binôme pour par exemple le remonter en cas de problème.

Mais le travail avec une sangle n'est pas accessible à tous les types de plongées et nécessite un apprentissage long. Si on est mal formé, cette pratique peut être dangereuse. Le rapport bénéfice risque penche plutôt en défaveur d'étendre cette pratique aux autres secteurs professionnels.

La priorité en termes de sécurité d'usage des recycleurs, c'est l'étanchéification complète des voies respiratoires par l'utilisation d'une sangle d'embout et d'un couvre-lèvres. De par

l'expérience dont bénéficient les militaires sur la plongée aux recycleurs en masse et le nombre important d'accidents recensés (certains plongeurs ont été sauvés grâce à cela), l'utilité de ces systèmes est avérée. Les plongeurs utilisent volontiers ce dispositif.

Recycleurs mécaniques vs électroniques :

Les cellules O2 qui entrent dans la composition des recycleurs électroniques ont une dérive dans le temps, elles vieillissent (on pense être à 100% d'O2 alors qu'en fait on est à 90%). Les militaires n'utilisent pas de cellules O2 dans le cadre de leurs plongées mécaniques. Ces cellules leur permettent de faire du contrôle expérimental et de vérifier que la théorie est applicable. Moyen de contrôle sans précision. Ce critère de manque de fiabilité et de robustesse des cellules O2 a été un des déterminants dans le choix de la marine française de fonctionner avec des recycleurs mécaniques et non électroniques. Certaines armées d'autres pays utilisent des recycleurs électroniques en interventions et connaissent des accidents (dont certains sont mortels).

Avantage du recycleur mécanique :

Il permet une fois sous l'eau de se concentrer uniquement sur le travail à réaliser et de ne pas avoir à contrôler sa PPO2, etc. Détachement du plongeur professionnel de la gestion des gaz et de l'appareil.

Désavantages du recycleur mécanique :

- Le travail doit se faire dans une fourchette de PPO2, rendant compliqué l'établissement d'une table de plongée
- Il est nécessaire d'avoir plusieurs mélanges fond si le travail se fait à des profondeurs différentes et donc un stock de bouteilles important en conséquence.

Désavantages du recycleur électronique :

- En matière de coût d'achat et d'entretien, il y a un rapport de 1 à 3 entre du mécanique et de l'électronique.
- Une plongée peut être arrêtée à cause d'une défaillance du système électronique (cellules O2 notamment)

Au niveau européen/international, aucune recommandation sur les recycleurs à utiliser (chaque pays fait son propre choix). En revanche, il existe des normes OTAN sur les gaz (qualité) et la chaux pour permettre l'interopérabilité d'un pays à l'autre.

Les pays qui ont choisi de fonctionner à l'électronique le font notamment dans l'objectif de répondre aux exigences de PPO2 dictées par la norme. La marine française est presque la seule marine à plonger avec une PPO2 si élevée et ne recense pourtant que très peu de cas d'hyperoxie.

La différence essentielle réside dans la sélection des personnels (aspect culturel).

- En France, on forme d'abord des plongeurs et ensuite on les spécialise en déminage, action commando…
- A l'étranger, c'est l'inverse, on va chercher des démineurs ou commando que l'on va former à la plongée. Ce qui justifie leur choix de respecter des PPO2 faibles et de fonctionner à l'électronique, pour être accessible à une population plus large.

Une différence culturelle Nord (pays anglo-saxons) /Sud (pays méditerranéens) explique les différences de pratiques d'usage des recycleurs (les 2 modèles sont cohérents) :

- Nord : depuis la 2ème guerre mondiale, plongée scaphandre (1 plongeur seul sous l'eau relié/géré à la surface)
- Sud : plongée en scaphandre autonome, s'explique par la bonne visibilité dont bénéficie les plongeurs en Méditerranée. Puis finalement cette technique s'est étendue à la plongée dans de mauvaises conditions de visibilité mais en instaurant la plongée par binômes sanglés.

Concernant le recul des autres nations sur l'utilisation des recycleurs électroniques, les Etats-Unis et la Grande-Bretagne sont passés aux recycleurs électroniques à la fin des années 80 passage (plongent peu et pas profond).

3) Profil des plongées militaires :

Les plongées types sont des plongées d'incursion de courte durée (maximum de 20 min) et géolocalisées (plongées dites « carrées » : descente sur le fond en modifiant très peu la profondeur Ex : 10-15 min en moyenne pour un PLD). En amont, la préparation de la plongée est très précise, le périmètre est bien délimité et les manquements à la procédure sont facilement et rapidement identifiés (sortent du cadre).

D'autres types de plongées spécifiques plus longues existent pour les NC ou PLD (2 heures ou 3 heures à 20 mètres par ex).

Sécurité et soutien sanitaire

L'équipe minimale sur le site pour encadrer les interventions est de 3 personnes minimum.

- en situation normale : 1 directeur de plongée en surface (DP) + 2 plongeurs à l'eau
- en situation dégradée : 1 superviseur secours en surface + 1 plongeur (à l'air jusqu'à 12 mètres maximum). Pour la plongée aux recycleurs, il faut toujours 2 plongeurs.
- en situation de secours : dans les cas où une équipe de secours est nécessaire 1 DP + 2 plongeurs (peuvent être les mêmes que ceux à l'eau)

Pour les interventions à des profondeurs inférieures à 35 mètres (plongées à l'air ou aux mélanges), il n'y a pas de plongeur de secours en surface.

Pour les interventions à des profondeurs supérieures à 35 mètres aux mélanges, la présence d'une équipe de secours aux mélanges est requise.

Pendant les interventions, un médecin doit toujours être joignable au téléphone (quelle que soit l'armée concernée ou la gendarmerie) voire en fonction des plongées, la présence d'un infirmier sur place peut être requise.

Matériel de secours :

- Oxygénothérapie (personnel formé à sa mise en œuvre)
- 1 ou 2 blocs d'air (permettent de faire les paliers en cas de remontée d'urgence par exemple)

La sécurité et le soutien sanitaire sont plus importants en formation que lors des opérations (augmentation du nombre de caissons, médecins et infirmiers). En effet, statistiquement dans la marine, la majorité des incidents arrivent en formation (la marine entraîne ses plongeurs dans des conditions théoriquement plus drastiques que la réalité).

Toute plongée à des profondeurs supérieures 35 mètres nécessite un caisson sur zone pour la marine et à moins de 2 heures pour l'armée de terre. La présence d'un caisson sur site permet de recomprimer en cas d'accident, mais également en cas d'incident lié au non respect du protocole (non respect des paliers par exemple).

4) Conditions d'utilisation des recycleurs

- Fréquence d'utilisation : quotidienne
- Nature du milieu : mer (milieu salin), rarement des plongées en eau douce. Les gendarmes plongent en rivière et l'armée de terre en lacs et rivières.
- Profondeur/Pression moyenne et maximale : 15 mètres (portuaire)
- Profondeurs maximum : 35 mètres à l'air (PLB) / 80 mètres au Trimix (PLD)
- Durée d'intervention : 10 à 15 min

Avantages de la mise en œuvre du recycleur

- autonomie
- profondeur d'emploi
- moins de narcoses
- moins de saturation

Désavantages

- accidents de type biochimique
- apprentissage et maitrise plus longue et plus complexe

5) Maintenance du matériel

Maintenance des caissons

- Niveau 1 (de base) : fait par les utilisateurs (les plongeurs d'armes (PLA), les infirmiers)
- Niveau 2 (entretiens plus lourds) : sous-traités par un industriel (COMEX)

Ces opérations de maintenance sont très précisément définies (listing des tâches fourni par Christophe Peny en aval de la réunion). En cas d'avarie de matériel, appel de l'industriel qui se déplace pour faire la réparation.

Durée de vie d'un recycleur

DC 55 = 50 ans d'utilisation (de 1952 à 2009), mais a subi des modernisations régulières. Améliorations techniques apportées notamment au niveau du travail ventilatoire. Si l'appareil dure moins de 20 ans, c'est de l'argent gaspillé.

Processus de développement des recycleurs pour la marine en collaboration avec l'industriel en amont (5 ans de développement pour le DC 55) pour leur permettre de répondre aux exigences d'utilisation des militaires.

- Avant la mise en service du CRABE (5 ans de mise au point) : 200 plongées d'essais au centre hyperbare (Cephismer) puis en mer.
- Une fois l'appareil mis au point, il faut définir la procédure de plongée (mise au point des tables de plongée)

Pour la mise au point de recycleurs destinés aux civils, il n'est pas envisageable de mettre en œuvre une phase aussi importante d'essais (matériel testé en plongée, mise au point des tables en plongée), d'une part au niveau logistique et d'autre part parce que cela augmenterait considérablement le coût d'un appareil. L'utilisation de matériel électronique avec PPO2 constante reste une solution pour les civils.

Ré-épreuve (maintenance des bouteilles, réservoirs)

L'armée applique les normes civiles :

- bouteilles en alliages/aciers : visitées par les ateliers de la marine
- bouteilles à roulements filamentaires : visitées par un contractant (industriel)

Si un défaut est constaté, la bouteille est déclassée et mise hors du circuit. La marine a mis en place des visites de fréquence annuelle, ce qui est plus strict que la ré-épreuve tous les 5 ans imposée par la norme.

Contrôle annuel des équipements - Modalités - traçabilité

Chaque unité de la marine qui possède du matériel de plongée désigne un plongeur responsable du matériel qui est chargé du suivi des dates de visites et de maintenance pour l'ensemble du matériel de plongée (détendeurs, bouteilles, brassières) excepté pour le recycleur (visite annuelle sous la responsabilité de chaque plongeur utilisateur – matériel individuel).

Pour permettre l'envoi de matériel en visite sans pénaliser le travail des plongeurs, la marine met en place 30% de matériel supplémentaire par rapport au nombre de plongeurs (surcoût, mais permet d'être sûr que le matériel est bien envoyé en visites).

Visites annuelles : le plongeur refait entièrement son matériel. Pour la partie détendeur sous-pression, la maintenance est sous-traitée par un industriel car les pièces sont celles en contact avec l'O2 respiré ce qui nécessite une salle blanche pour le démontage. Le respect de la norme O2 est complexe.

Des coûts très importants sont investis dans le contrôle du matériel. Comment limiter ces coûts sans aller au détriment de la sécurité des plongeurs ? C'est difficile notamment car certaines pièces d'apparence en bon état sont en réalité abîmées et que d'autres s'usent (par exemple dégradation par les UV, la chaleur, des pièces en caoutchouc) malgré le fait que les appareils ne sont pas utilisés.

Prophylaxie

La procédure est prise en compte par la réglementation de la marine via notamment l'approvisionnement des unités en solutions désinfectantes. Il n'y a pas d'obligation réglementaire de désinfecter les matériels à partir du moment où il n'y a pas d'échange de matériel. Les plongeurs de la marine utilisent principalement du matériel individuel et s'échangent donc peu les parties en contact avec la bouche (détendeurs). Si nécessaire, des désinfectants sont mis à la disposition des plongeurs.

Dans le cas de plongée dans des eaux insalubres ou très chaudes, le matériel est rincé au bac et les opérateurs peuvent individuellement, s'ils le souhaitent, faire une désinfection complémentaire.

Dans le civil, une nouvelle recommandation préconise de mettre à disposition des bacs de décontamination, mais la mise en œuvre de cette mesure est compliquée.

L'employeur met en place la logistique nécessaire, mais l'opérateur ne suit pas nécessairement. Chez les PLB, pas de sensibilisation à cette problématique. Les PLD qui utilisant du matériel individuel toute l'année sont plus sensibles à ces questions.

La tuyauterie des recycleurs n'a pas monté de contaminations particulières.

Problème de matériel à signaler ?

Les accidents sont quasiment liés uniquement à des erreurs humaines (problèmes de montage du matériel – oubli de chaux sodée, oubli de vissage du sac…) ou à des problèmes physiologiques.

Concernant les défaillances purement techniques à signaler : départs de feux sur flexibles à l'équilibrage des bouteilles (3 incidents recensés) en surface, donc sans conséquence sur la plongée. A rapporter à 60 000 plongées recycleurs par an.

Après chaque accident, tout le profondimètre et le matériel sont envoyés à la Cephismer pour une expertise complète: analyse des gaz, de la chaux, démontage du recycleur, analyse de la courbe de plongée. Un retour d'expérience est fait à l'issue de chaque incident évitant ainsi que les erreurs ne se répètent.

Aucune erreur de procédure recensée à l'usage du recycleur.

En cas de survenue d'un incident avec le matériel pour toutes les armées, sous forme d'une fiche courte ou FTL (fiche descriptive de l'incident : environnement – type d'intervention – description du problème). Système de remontée d'informations bien rodé permettant une réactivité importante.

6) Remise à niveau des connaissances sur l'utilisation des matériels (entretien, maintenance, réparation, etc.)

Modalités et périodicité :

PLB (population dont ce n'est pas le métier de plonger)

Un rdv annuel appelé JSP (journée sécurité plongée) pour revoir la documentation, le matériel, s'assurer que les notions sont bien intégrées + une aptitude professionnelle quadriennale à la Cephismer (tests théorique/vérification des connaissances en réglementation et problèmes de plongée + pratique/vérification du niveau physique et technique pour faire un sauvetage) ainsi que des audits dans les unités tous les deux à trois ans.

PLD/NC (professionnels de la plongée)

JSP annuelle + entretien annuel de leur appareil (démontage, révision du manuel technique…) + conduction d'audits dans les unités tous les 2 ans par la Cephismer pour vérifier le matériel, la documentation, les entrainements, *etc*.

Pour les PLB, PLD et NC, la marine impose des niveaux d'entrainements semestriels représentant entre 5 et 6 plongées imposées sur des exercices de sécurité (par tranche de 6 mois) dans le but de réviser les procédures de sécurité.

Concernant la fréquence de plongées par plongeur (PLB et PLA), elle représente environ 50 plongées maximum par semestre. Dans la réglementation de la marine, il est dit que la régularité

des plongées participe à la sécurité des plongeurs et ce maximum est donc un objectif à atteindre pour rester opérationnel (parfois même dépassé). La répartition des plongées sur le semestre doit se faire le plus régulièrement possible.

Si un plongeur n'a pas plongé depuis longtemps (retour de vacances, inaptitude, maladie…), l'armée impose une progressivité sur la reprise des plongées et l'atteinte des profondeurs maximum de travail (ne pas descendre à 80 mètres directement). Il s'agit d'une mesure assez récente (5-6 ans) et difficile à formaliser (le risque étant de bloquer certaines activités). Un tableau a ainsi été réalisé pour les PLB et PLA de manière pragmatique en prenant en compte des tranches d'arrêt larges (ex : grosse coupure estivale, on repart de zéro en opposition avec une coupure de 15 jours où on repart du palier inférieur).

Traçabilité des parcours :

- La Cephismer centralise toutes les données RH sur les plongeurs dans une base de données RH de la marine qui recense par plongeur entre autres les dates des contrôles quadriennaux et les aptitudes.

- Une 2ème base de données concerne tout l'entrainement de la marine et recense depuis 3 ans toutes les plongées par plongeur (date de la plongée, mélange utilisé, profondeur…).

NATURE DES GAZ UTILISES

Oxygène 100% : utilisé en opération pour plonger jusqu'à 7 mètres, avec incursions de 3 minutes à 18 mètres (hors cadre du décret hyperbare) et aux paliers.

Pour l'utilisation aux paliers, l'O2 en mélange (80%) étant mieux toléré que l'O2 pur, il présente potentiellement un intérêt en terme de sécurité pour des populations professionnelles moins sélectionnées et donc plus sensibles.

Air : utilisé jusqu'à 60 mètres (limitation à 50 mètres avec la nouvelle réglementation)

D'après le décret de 2011

- Mention A = plongée à l'air limitée 50 mètres (travail sous l'eau induit la production d'efforts, augmentation de la saturation et donc une limitation de la profondeur à 50 mètres)

- Mention B = plongée à l'air limitée 60 mètres (moniteur de plongée)

NITROX : 40%, 30%, 60% ; 40% (circuit ouvert), 50%,

+ divers pourcentages utilisés en centre hyperbare : les gaz sont fabriqués sur le centre pour la plongée à saturation (ajustement de la PPO2 à la pression souhaitée), en revanche, en plongée d'incursion on utilise un gaz déjà fabriqué.

TRIMIX : 18% (circuit ouvert), 23% (semi-fermé)

HELIOX : pas utilisé en unité opérationnelle, uniquement en centre hyperbare à 8 ou 10 % parce qu'il refroidit plus et surtout qu'il est beaucoup plus cher.

D'après le décret de 2011, seule la mention A est limitée à 90 mètres en plongée autonome.

Mode de fabrication et modalités d'analyse des gaz :

La Cephismer ne fabrique pas ses gaz, elle se fournit auprès d'un industriel (Air Liquide) qui ne fait pas d'analyse de gaz (processus qualité qui garantit que la bouteille fournie a été remplie avec le bon gaz). Les bouteilles de gaz sont identifiées par des bagues de couleurs qui

correspondent au gaz et à son pourcentage. Jusqu'à présent l'industriel n'a jamais été mis en défaut.

Il n'y a pas de contrôle des gaz pré-immersion, mais des analyses régulières sont réalisées sur les racks par le LASEM avant le gonflage des bouteilles de plongée.

Pour Jord Lucas, c'est cette phase de gonflage des bouteilles par les opérateurs (doivent être avertis) qui est le point critique sur la question de la sureté d'utilisation des gaz et c'est donc sur cette phase que doivent être axés les efforts. Les nouvelles stations de gonflage sont capables de reconnaitre des bouteilles, préalablement marquées pour un mélange donné. La machine va identifier les bouteilles et le mélange correspondant et empêchera par exemple le gonflage de bouteilles à 30% au lieu de 50%.

-avant la plongée : Il n'est pas possible de réaliser des analyses de gaz fiables, des analyseurs de gaz portatifs sont mis à disposition des plongeurs et permettent de faire une levée de doutes, mais la vérification n'est pas imposée (en pratique peu le font).

-pendant l'exposition : pas de contrôle. Un boitier électronique (sorte de boîte noire) peut donner des informations sur le gaz respiré possible en temps réel ou après la plongée. Ce n'est pas systématique d'autant que ce n'est pas très opérationnel car difficile à calibrer et peu fiable. L'utilisation de ce système reste néanmoins intéressante pendant l'entraînement.

-après l'exposition : Le LASEM fait des analyses des gaz et de la chaux sodée.

Type de tables de décompression/ Ordinateurs utilisés

Ce sont les tables établies par la marine au centre hyperbare.

Les ordinateurs de plongée ne sont pas utilisés par la marine à ce jour mais des systèmes apparentés sont en cours de développement. L'utilisation des ordinateurs pourraient être envisagée dans la population des PLA (professionnels avertis), pas pour les PLB à priori. Attention aux dérives d'utilisation des systèmes électroniques qui sont susceptibles de faire perdre tout sens critique aux plongeurs sur le contrôle de leur plongée.

Avantages sur le plan technique, sur le plan sanitaire, de l'utilisation des mélanges par rapport à l'air

- Pas de narcose.
- Moins de saturation.

Limites

- Plus onéreux.
- Prise en compte de la compatibilité à l'O2 nécessite des compétences
- Plus d'accidents biochimiques
- Complexité de mise en œuvre (spécialistes)

EFFETS SANITAIRES RECENSES LIES A L'EXPOSITION DES TRAVAILLEURS AUX CONDITIONS HYPERBARES / ACCIDENTOLOGIE

Comme cité précédemment, les accidents sont quasiment liés uniquement à des erreurs humaines (problèmes de montage du matériel – oubli de chaux sodée, oubli de vissage du sac…) ou à des problèmes physiologiques.

L'utilisation des recycleurs peut néanmoins causer des accidents de type biochimiques.

On observe actuellement une augmentation globale (toutes pratiques confondues : apnée, plongée à l'air…) du nombre d'œdèmes pulmonaires (OP). Est-ce lié à une modification de la sensibilité de la population ? Est-ce lié au matériel et notamment au recycleur ?

L'analyse de la marine est que les OP ne sont pas causés que par les recycleurs et surviennent beaucoup en formation initiale ce qui peut laisser sous-entendre que l'utilisation du recycleur révèlerait plus rapidement les sensibilités sous-jacentes à l'OP d'immersion.

Le centre pneumoïque du CRABE est décalé par rapport au DC 55 : le déclenchement d'un OP peut être favorisé par ce type de matériel pour une personne qui présente une sensibilité sous-jacente.

Le positionnement des faux-poumons en antérieur ou en latéral est envisageable suivant le type de travail à réaliser sous l'eau (la présence des faux-poumons à l'avant est gênante pour travailler).

PRECONISATIONS POUR AMELIORER LA SECURITE DES TRAVAILLEURS EN MILIEU HYPERBARE AVEC CE TYPE DE MELANGE

Point de vue de la défense

- pas d'utilisation de l'ordinateur de plongée
- mise au point dans la marine d'un système de localisation des plongeurs en intervention
- préconise une limitation de la profondeur de plongée à l'air à 50 mètres et l'utilisation des mélanges au-delà de 50 mètres.
- Réflexion sur le foramen ovale perméable (FOP)
- L'utilisation du recycleur permet de prévenir les accidents de désaturation s'il est utilisé dans de bonnes conditions.
- intérêt des logiciels exploitant de la base de données pour tester de manière théorique et par le calcul des évolutions de tables
- l'ouverture de la plongée aux recycleurs aux autres secteurs professionnels est envisageable. Néanmoins, la pratique en masse du recycleur peut être dangereuse, il faut peut-être la cantonner à une petite population spécialisée car cela nécessite une organisation très robuste qu'il s'agisse de la chaine de maintenance, des processus de formation sur le matériel, de la chaine de fabrication des gaz. A minima, plonger en binôme avec une sangle d'embout semble indispensable pour pratiquer ce type de plongées.

CNRS - Centre national de la recherche scientifique / IMBE - Institut Méditerranéen de Biodiversité et d'Ecologie marine et continentale

M. Romain DAVID – Ingénieur d'études à l'IMBE, Chargé de mission SINP (Système d'Information sur la Nature et les Paysages) Mer - façade méditerranéenne

Date de l'audition : 27/11/2013

Lieu de l'audition : Marseille

DEFINITION DE LA POPULATION PROFESSIONNELLE

Effectifs et mentions des plongeurs

Pratiquement tous les instituts de recherche intègrent la plongée scientifique. Ils sont représentés au Comité National de la Plongée Scientifique (CNPS)*. Ils suivaient tous les instructions parues au B.O. du CNRS [n°980002IGHS du 3 décembre 1998].

En France, il y a entre une douzaine de stations/laboratoires marin(e)s actifs dans les activités sous-marines avec des équipes d'environ 10 à 15 plongeurs actifs par institut (hors plongeurs IFREMER). On compte donc environ 250 plongeurs scientifiques actifs au CNRS, et dans les autres organismes et universités (estimation Colimpha**).

**Association Française des Plongeurs Scientifiques

Les plongeurs sont classés pour les 2 tiers dans la mention B, classe2 et appartiennent pour le dernier tiers à la mention B, classe 1. Quelques exceptions anecdotiques issues de la mention A, classe 2 ou de la mention B, classe 3.

Age moyen des « travailleurs hyperbares » :

Ces métiers comptent beaucoup de « vieux plongeurs » (plus de de 40 ans) avec des extrêmes allant de 20 ans pour les plus jeunes à 70 ans pour les plus âgés (actuellement 78 ans).

Nombre moyen d'interventions annuelles/ « travailleur hyperbare » :

Les plongeurs interviennent en moyenne sur 20 à 25 plongées annuelles. Certains plongeurs très actifs (plongeurs de station marine) peuvent faire jusqu'à 200 plongées à l'année.

Le minimum de plongées requis pour rester opérationnel est de 12 plongées dont 6 plongées à caractère scientifique.

Nombre moyen d'années de travail hyperbare / « travailleur hyperbare » :

Les plongeurs scientifiques du CNRS dépassent souvent les **25 ans de carrière** (peu d'accidents).

TECHNIQUES D'INTERVENTION EN CONDITIONS HYPERBARES

Pratiques de plongée au CNRS

- **Systèmes de plongée autonome**

Pas de plongée aux mélanges au sein du CNRS.

- **Air :** concerne la grande majorité des plongées qui sont réalisées à des profondeurs de 40 mètres et moins.
- **Air et décompression à l'oxygène** (tables air-oxy-6 mètres : 1,6 bar PPO2) dans le cadre de plongées carrées ou plus à risque. Ces plongées sont plus rares et concernent peu de plongeurs. Elles correspondent à des interventions longues à profondeur moyenne (20 à 30m) ou plus courtes à 45-50 mètres, cela représente environ 1/20ème des plongées et entrainent une décompression à l'oxygène.

Les plongeurs du CNRS respectent les exigences réglementaires mais il leur est quelques fois possible de sortir des clous *via* l'utilisation d'un biberon de secours en décompression à 6 mètres. En effet, lors d'une intervention près des rochers par exemple, le fait de porter la pony sur soi présente plus de sécurité que d'avoir à la chercher sur un ancrage lourd dont on peut s'être éloigné (courant, visibilité). Le choix de la méthode dépend des conditions de plongée (travail à faire, nombre de plongeurs disponibles…).

L'approvisionnement en gaz respiratoires est assuré *via* l'achat de bouteilles dont le remplissage est réalisé par des prestataires de services agréés.

- **Caisson de décompression**

L'éloignement du caisson de recompression du site de plongée interfère sur les possibilités des plongées à paliers et la durée de ceux-ci. La réglementation limite les plongées pratiquées sans caisson hyperbare à moins de deux heures à une profondeur maximale de 30 m ne nécessitant pas de palier physiologique à la remontée (ce qui ne supprime pas le palier de principe à 3m).

- **Apnée**

Cette pratique n'est actuellement pas réglementée. Elle est plutôt mise en œuvre par les bureaux d'études et les associations pour immersions sur des petits fonds (inférieurs à 12 mètres).

Au sein du CNRS, une ouverture sur cette pratique serait intéressante pour l'observation, la prise d'échantillons, la maintenance de matériels (capteurs de surfaces à nettoyer…). La durée des séquences de travail serait relativement courte, excepté dans le cas de la réalisation de cartographies d'habitats où les plongeurs peuvent rester plusieurs heures dans l'eau d'affilée à nager pour vérifier les profondeurs par exemple (sondeur à main). Les plongeurs associatifs recrutés pour ce type de travaux plongent parfois seuls.

Une immersion systématique en binôme serait à préconiser pour la pratique de l'apnée.

- **Recycleur**

Ces appareils ne sont pas utilisés au CNRS. Ce sont des appareils complexes qui semblent fiables d'utilisation à partir du moment où on maitrise parfaitement la précision de la technique. Ils nécessitent une formation spécifique sérieuse et une pratique régulière pour plonger en sécurité. Se pose la question de la pertinence d'utiliser cette technique pour les plongeurs scientifiques dont la plongée n'est pas le cœur de métier et qui ont beaucoup d'autres activités à côté.

Attentes immédiates des personnels du CNRS

Le nouveau décret offre la possibilité aux mentions B de plonger aux mélanges mais ne donne aucune règle de mise en pratique et de formation. Pour le moment les employeurs sont en attente d'un arrêté formation pour pouvoir utiliser ces mélanges.

<u>Profondeurs d'intervention intéressant les scientifiques pour les plongées aux mélanges :</u>

Concernant les enjeux scientifiques en termes de profondeurs de plongée, la zone photique va jusqu'à 150 mètres et suivant les profondeurs, les habitats sont différents. De l'infralittoral jusqu'à 70 mètres il s'agit de coralligène non fossile mais au-delà de 70 mètres, les écosystèmes sont différents et présentent des enjeux en termes de ressources car ce sont des endroits qui sont moins soumis aux pressions de pêche et de prélèvement (même si le recycleur et la plongée au mélange se démocratisent).

Même si les robots existent et doivent être utilisés, certaines opérations ne peuvent pas être réalisées de manière automatisée. Il y a de nombreux intérêts scientifiques et techniques à aller voir les choses directement, faire soi-même des prélèvements.

- <u>Tranche 50-70 mètres</u> : oui
- <u>Tranche 70-90 mètres</u> : oui, dès que des niveaux d'apprentissage et des procédures de sécurité suffisantes seront développées

Les scientifiques souhaitent intervenir aux mélanges jusqu'à 90 mètres.

- <u>Tranche 90-120 mètres et au-delà</u> : enjeux scientifiques mais…

Des bureaux d'études (Andromède) font des plongées dans la zone de 90 à 120 mètres. Néanmoins, il est peu probable dans un avenir proche que les plongeurs au CNRS souhaitent développer les activités de ses plongeurs à ces profondeurs car même si l'intérêt scientifique existe, la mise en œuvre de telles plongées reste compliquée et onéreuse.

<u>Nitrox</u>

Les plongeurs du CNRS souhaiterait en grande majorité pouvoir plonger au Nitrox (22% à 40% d'O_2) en mélange fond, sous réserve d'une formation adaptée du personnel (formation/équivalences sécurité) et l'acquisition du matériel nécessaire, pour aller plonger dans les tranches de profondeurs adaptées (20 – 45m) en améliorant la sécurité et en diminuant la fatigue.

Les personnels CNRS seraient aussi intéressés pour faire des paliers à l'oxygène à 80% qui permettent de commencer les paliers dès 9m en étant encore à une ppO_2 inférieure à 1,6 ; ces mélanges suroxygénés sont plus faciles à approvisionner et bien moins couteux que l'O_2 pur. Cela impliquerait l'utilisation d'autres tables que les MT. Les scientifiques souhaitent pouvoir garder un profil de plongée « air », mais en utilisant du nitrox qui offre des conditions de décompressions avantageuses en terme de durée de paliers et, si on garde les paliers air, induit beaucoup moins de fatigue. (Sans compter que la profondeur équivalente en termes de charge de N_2 est réduite d'autant)

Une modification des profils de plongée n'est pas envisagée en priorité mais les plongeurs pourront augmenter leur nombre de plongées car la fatigue sera diminuée. Cela va dans le sens de la sécurité selon Romain David.

Les plongeurs scientifiques du CNRS seraient intéressés par une banalisation de l'utilisation du nitrox surtout dans la zone des 20 à 35m.

<u>Trimix</u>

L'utilisation du trimix normoxique est envisageable au CNRS si cela va dans le sens de la sécurité.

Globalement, l'utilisation de ces mélanges doit être développée chez les plongeurs du CNRS car elle permet une diminution de la fatigue des plongeurs et donc une amélioration de la sécurité et de la qualité du travail, même dans les zones les plus profondes accessibles à l'air.

Tables de décompression/ Ordinateurs utilisés

Le CNRS utilise les tables de décompression MT. L'utilisation des ordinateurs de plongée est limitée car il n'existe pas d'ordinateurs qui intègrent ces tables MT. La nouvelle réglementation pourrait laisser à l'employeur le choix d'autoriser l'utilisation d'ordinateur basé sur tel ou tel algorithme.

Il pourrait être intéressant selon le CNRS d'assouplir les tables MT pour les activités non physiques, en petite profondeur. Lorsqu'on fait 2 plongées successives par exemple, il est considéré pour la planification de la 2ème plongée que le plongeur est saturé à 100%, ce qui lui donne, suivant l'intervalle de surface, des paliers avant même sa deuxième mise à l'eau.

Maintenance du matériel

La maintenance est sous-traitée au maximum. Le CNRS a besoin de fournir des certificats pour justifier de la maintenance des EPI.

Des réparations sont possibles en local avec les techniciens mais jamais pour des réparations pouvant porter enjeu sur la sécurité et demandant une certification.

Prophylaxie

Il n'y a pas de procédure systématique de désinfection du matériel.

La plupart du matériel est personnel, hormis pour les jeunes plongeurs (stagiaires).

Equipe minimale sur le site (pour encadrer les interventions) : 3 personnes

Lors d'une intervention de plongée scientifique en règle générale, le travail est réparti entre les personnes affectées à l'opération (exemple la mesure) et à l'aide de l'opérateur (noter, porter le matériel) à la mesure. Un surveillant de surface est obligatoirement présent. Pour assurer la sécurité, la deuxième palanquée reste en surface dans le cas de plongées profondes, avant de plonger à son tour (amélioration du temps de réaction en cas d'accident, car pas de rappel de plongeurs).

La plupart du temps, seulement 3 ou 4 plongeurs sont disponibles pour participer à une intervention. La législation actuelle laisse une marge de manœuvre, permettant de restreindre les équipes tout en respectant les exigences réglementaires avec des rotations des titres/fonctions et cumul des titres. Pour permettre à l'activité de plongée scientifique de perdurer, notamment dans le cadre des contraintes budgétaires actuelles, il ne faudrait pas durcir les contraintes à ce niveau.

Il n'y a pas de conseillers à la prévention hyperbare (CPH) au CNRS pour le moment. Le fait de nommer les CPH pose problème car il n'y a pas de formation et donc aucune définition des pré-requis nécessaires pour former les CPH dans le public (problème de la prise de responsabilité qui doit être codifiée et qui engendre des coûts…Attente de l'arrêté formation).

Irrégularité des plongées

Un accident récent (milieu associatif scientifique) a remis au centre du débat le problème de manque d'entrainement des travailleurs après un arrêt prolongé des activités de plongée. Si l'intervalle de temps entre 2 plongées est très long, il n'y a pas de progressivité imposée pour la reprise des interventions. Il faut recommander des plongées de réhabilitation qui permettent de retrouver des sensations.

Formation (personnes et matériel) et remise à niveau des connaissances

Lors de la formation de chef de plongée scientifique (CPS), un décryptage de toutes les tables MT est réalisé. Pendant le stage, la moitié des plongées sont profondes, et sur les profondes engagées, des décompressions à l'oxygène sont faites.

A la connaissance de Romain David, les plongeurs scientifiques ne sont pas recyclés pour l'utilisation de l'oxygène. Il serait intéressant de recommander qu'une information adaptée soit dispensée à ce sujet.

EFFETS SANITAIRES RECENSES LIES A L'EXPOSITION DES TRAVAILLEURS AUX CONDITIONS HYPERBARES / ACCIDENTOLOGIE

Plongées scientifiques au CNRS

Très peu d'accidents ont été recensés chez les plongeurs du CNRS. La plupart des plongeurs ont un ordinateur au bras, mais fonctionnement avec les tables MT.

La mise en place du diplôme de chef de plongée scientifique (CPS) fait qu'il y a obligation que chaque intervention soit encadrée par une personne qui a passé ce diplôme là. Cette personne a notamment pour rôle d'optimiser la sécurité à chaque plongée par une planification systématique avant la mise à l'eau.

Autres plongées scientifiques

Au cours des plongées scientifiques en général, des accidents en plongée ont pu arriver (chiffres ?) et également des incidents de plongées, notamment des barotraumatismes légers. Mais pas plus d'informations car ils sont rarement signalés. Ces accidents concernent plus les associations et les bureaux d'études qui ont des rythmes d'intervention plus élevés.

PRECONISATION POUR AMELIORER LA SECURITE DES TRAVAILLEURS EN MILIEU HYPERBARE AVEC CE TYPE DE MELANGE

Une ouverture pour les scientifiques à la plongée Nitrox/Trimix serait intéressante.

La réglementation autorise l'utilisation de matériel standards jusqu'à 40% d'oxygène. Outre la réglementation actuelle, le seul frein reste la formation des plongeurs et le coût des gaz utilisés. S'il est demandé plus de capacités humaines pour faire la même chose, les activités des plongeurs scientifiques vont fatalement diminuer.

EUROPE ET INTERNATIONAL

Concernant la plongée scientifique en Europe et à l'international, la plongée scientifique peut faire l'objet d'une réglementation spécifique ou ne pas être reconnue du tout. En Europe, un « panel » du Marine Board (ESDP : European Scientific Diving Panel***) est consacré à cette pratique et est officialisé depuis octobre 2008. D'abord présidé par la France, ce panel l'est aujourd'hui par le Royaume Uni. Au départ seuls trois pays étaient pourvues de règles (Allemagne, France, Royaume Uni). Le travail de ce panel a permis à d'autres pays d'Europe de faire reconnaître la plongée scientifique et de se doter d'une réglementation (Suède, Italie, Belgique, Finlande). D'autres pays sont en chemin (Grèce, Espagne, Portugal, Norvège, Slovénie, …). Ces pays ont adoptés des standards minimums de formation (ESD : European Scientific Diver, et AESD : Advanced European Scientific Diver)**** et ont élaboré des recommandations et règles de bonne pratique. L'ESDP encourage tous les pays d'Europe à le rejoindre, ainsi qu'à des pays satellites (Turquie, Israël, …). Il publie des « consultation papers » sur différents sujets, y compris d'avancées technologiques.

*** ESDP <http://www.imbe.fr/european-scientific-diving-panel.html>

**** European Standards <http://www.imbe.fr/sd-european-standards.html>

COMEX - Compagnie maritime d'expertise

M. Bernard GARDETTE - Docteur ès Sciences, Directeur scientifique de la COMEX
Date de l'audition : 27/11/2013
Lieu de l'audition : Marseille

DEFINITION DE LA POPULATION PROFESSIONNELLE

Jusque dans les années 90, la COMEX a été une grosse société de plongée. Les activités des travailleurs de la COMEX concernaient notamment la mention A, classe 3 et consistaient essentiellement à de la saturation hélium (plongées longues) avec un peu de plongée à l'air pour les interventions courtes (jusqu'à 50 mètres). Hormis les plongeurs profonds, les plongeurs étaient équipés de narguilés.

Le recycleur était utilisé uniquement en secours lors des plongées profondes. Il avait été fabriqué et mis au point par la COMEX au moment du projet HYDRA 8 à 500 mètres de profondeur et permettait aux plongeurs d'avoir 20 minutes d'autonomie pour pouvoir rejoindre la tourelle de plongée en cas de problème. Aucun développement n'avait été envisagé à l'époque car on pensait que c'était dangereux.

La COMEX avait mis en place un système de recyclage d'hélium (cher) en surface où il était reconditionné.

La COMEX a été largement à l'origine de la réglementation encadrant les activités hyperbares mise en place dans les années 90.

Si les activités de plongée de la COMEX ont cessé au moment de la vente (en 1992), l'entreprise continue actuellement à mettre au point du matériel. Parmi les salariés se trouvent encore des plongeurs classe 2 mention B ou D qui sont amenés à manipuler du matériel en caisson ou à plonger à l'air jusqu' à 40 mètres (pour crocheter-décrocheter le sous-marin). Les travailleurs ne plongent plus aux mélanges, ni aux recycleurs (même si cette pratique n'a jamais été très développée à la COMEX).

Age moyen / Nb de « travailleurs hyperbares » :

En 1992, au moment de la vente de la COMEX, l'entreprise comptait 600 plongeurs dont environ 200 plongeurs français. Les travailleurs avaient 30 ans en moyenne, avec une fourchette d'âge allant de 21-25 ans pour les plus jeunes et 45 à 50 ans pour les plus vieux.

Actuellement 50 personnes travaillent à la COMEX.

Nb moyen d'interventions annuelles/ « travailleur hyperbare » :

Dans les années 70, certains plongeurs faisaient 250 jours de saturation par an (plus de la moitié de l'année). De ce fait, la COMEX a instauré une limitation à 100 jours cumulés le temps de plongée avec une durée hors du caisson en sortie ou moins égale à la durée dans le caisson.

Actuellement, la réglementation limite à 200 mètres, la profondeur maximale pour les interventions à saturation, ce qui est bien selon Bernard Gardette.

Nb moyen d'années de travail hyperbare / « travailleur hyperbare » :

Les plongées ont démarré dans les années 70 donc certains ont travaillé pendant environ 20 ans, jusqu'à la vente.

TECHNIQUES D'INTERVENTION EN CONDITIONS HYPERBARES ET NATURE DES GAZ UTILISES

2 types de plongées étaient mises en œuvre à la COMEX :

- Les plongées à l'air jusqu'à 50 mètres maximum, pour des interventions courtes
- Les plongées à saturation en hélium, pour des plongées plus longues (mise au point par la COMEX des tables He en 1970)

Préconisations de Bernard GARDETTE concernant les gaz à utiliser :

- Tranche 0-50 mètres : air
- Tranche 50-70mètres : trimix
- A partir de 70-80 mètres, atteinte de la limite d'utilisation du trimix, préconiser l'utilisation d'hélium.

- **RECYCLEURS**

Quelles seraient les limites de profondeur à définir ?

Il est important d'avoir à l'esprit que la probabilité de faire un accident de décompression (ADD) augmente avec la charge en gaz contenue dans l'organisme et qui est fonction de la profondeur de la plongée et du temps passé au fond. La formule permettant de calculer le coefficient de charge en gaz (Q) est la suivante :

Q = profondeur (exprimée en bars ou mètres d'eau) X racine carrée (temps au fond)

A une charge en gaz Q va ensuite correspondre un risque d'ADD.

Pour Bernard Gardette, envisager la plongée d'intervention à 120 mètres, 120 minutes, c'est purement utopique, voire dangereux (y compris à l'hélium et même avec une tourelle de plongée). Heureusement que les interventions à cette profondeur dépassent rarement 20 minutes.

Quoi qu'il en soit, étant donné que dans le cadre professionnel (et notamment pour la mention A), les plongées sont limitées à 3 heures, sans avoir à définir une profondeur maximale autorisée, les profondeurs accessibles par les travailleurs vont être limitées par les temps de plongée autorisés.

La tranche des 90 mètres préoccupe les autorités, il y a une demande des professionnels, mais la question est de savoir s'il est possible d'encadrer correctement ce type de plongées. La loi autorise d'aller jusqu'à 27 heures de décompression (en tourelle par exemple).

Décompression au trimix versus héliox :

Bernard Gardette souhaite préciser que contrairement aux idées reçues, les décompressions à l'hélium ne sont pas nécessairement plus longues qu'au trimix. Le basculement se fait à partir du moment où on dépasse 20 minutes de plongée au fond.

A moins de 20 min, en azote (trimix), les décompressions peuvent être plus courtes (pas forcément le même niveau de sécurité). Il est donc plus intéressant d'utiliser du trimix sur ce type de durées puisque cela permet des décompressions plus courtes.

Au-delà de 20 minutes en revanche, les décompressions à l'hélium peuvent être plus courtes qu'à l'azote mais il faut être beaucoup moins laxiste en termes de respect des paliers en He par rapport à l'azote pour être en sécurité. Il n'y a pas de marge de manœuvre, le suivi des tables He doit être très précis, à la minute près, sinon il y a des risques d'ADD.

Question de l'utilisation de l'héliox en recycleur plongée professionnelle :

La sensibilité des décompressions à l'héliox et le fait qu'elles doivent être respectées avec une grande précision sous réserve de présenter un risque d'accident pour les plongeurs peut constituer un facteur limitant pour son utilisation en conditions professionnelles.

Mais d'un autre côté, même si ce n'est pas simple, il faut se demander si d'autres alternatives aussi sécuritaires et confortables (sous réserve de bien maîtriser la mise en œuvre de cette technique) sont disponibles.

Quoi qu'il en soit, le développement de ces pratiques dans le cadre professionnel passe par une bonne formation des travailleurs, une meilleure connaissance des recycleurs, un entrainement régulier et des temps de plongée imposés.

Concernant la toxicité de l'oxygène :

Bernard Gardette signale une erreur de transposition de l'ancienne réglementation dans la nouvelle réglementation et qui concerne le fait qu'en recompression en caisson, il est possible (selon la réglementation actuelle) d'utiliser de l'O2 à 2,2 bar jusqu'à 24 heures d'exposition…attention aux erreurs de copier-coller présentes dans le nouveau texte.

Utilisation des recycleurs dans la tranche 70-90 mètres:

Tables de décompression

Pour l'héliox, limitation de la profondeur mais surtout limitation de la durée d'utilisation. Les tables existantes sont à priori plus restrictives qu'un ordinateur.

Pour 20 à 25 min de plongée, Bernard Gardette préconise d'utiliser les tables actuelles du Ministère du travail en les majorant. Il faudrait moderniser un peu ces tables en leur appliquant un coefficient de sécurité 1,4 sur la base des statistiques. En effet, tous les 20 ans on multiplie les temps de décompression par 1, 4 en moyenne.

Des tables ont été mises au point par la COMEX pour une intervention de 15 min à 100 mètres (rapport confidentiel défense) avec une décompression d'environ 2 heures, moins de 50% de bulleurs et sans accident de décompression. Mais il y a peu de recul étant donné le peu d'individus testés.

Des tables disponibles à l'étranger sont utilisables et offrent la possibilité de plonger 20 à 25 min sur des profondeurs max de 100 mètres.

Stratégie de décompression

Pour l'utilisation des recycleurs dans la tranche 70-90 mètres, limiter à 1.2 bar la PPO2 en mélange fond et 1,6 bar en déco.

Demande des plongeurs professionnels à l'attention de la COMEX :

La demande la plus fréquente concerne la mise au point de tables pour les spéléologues correspondant à des profils de plongée « bizarres » qui leur sont propres.

Les gens « raisonnables » souhaitent des tables pour évoluer à 80 mètres en entrainement et à 100-120 mètres en exploration, sans dépasser les 20 minutes de plongée. Pour cela ils ont besoin d'utiliser des recycleurs, mais pas plus de 20 à 25 minutes. Pour assurer leur sécurité, il est souhaitable d'avoir comme système de secours, un autre recycleur. Si cette redondance présente des avantages évidents, elle pose problème en cas d'essoufflement car l'hypercapnie ne sera pas rattrapée par ce système de secours.

- **APNEE :**

Jamais d'emploi d'apnéistes professionnels à la COMEX.

Le décret va limiter l'apnée professionnelle à 10 mètres de profondeur, 6 heures par jour (travail classique des chasseurs…même si certains peuvent descendre jusqu'à 25 mètres).

Le développement de cette pratique en conditions professionnelles nécessite de mettre en place des règles de bonnes pratiques :

- Imposer des durées de récupération en surface comparativement aux durées d'intervention.
- Plongée systématique en binôme + surveillance en surface.

Bernard Gardette mentionne une enquête de Frédéric Lemaitre réalisée au Japon sur des plongeurs en apnée à 15 mètres de profondeur 6 heures (3h le matin / 3h l'après-midi) et qui avait relevé des accidents neurologiques chez les plongeurs.

EFFETS SANITAIRES RECENSES LIES A L'EXPOSITION DES TRAVAILLEURS AUX CONDITIONS HYPERBARES / ACCIDENTOLOGIE

La Comex a toujours fait ses déclarations d'accidents de plongée, en revanche, les statistiques sur les effets à long terme de la plongée chez les travailleurs de la COMEX n'ont pas été publiées, notamment en lien avec le fait que les assureurs augmentaient les primes d'assurance en cas d'accidents. Des statistiques internes existent mais sont confidentielles.

Accidents de décompression

Bend

Le bend est une douleur autour ou dans une articulation, qui peut être due à la formation de bulles au niveau des tendons, des muscles, de la synoviale, et de l'os et dans ce dernier cas, une évolution vers une ostéonécrose dysbarique est à redouter. Il est localisé préférentiellement à l'épaule et son diagnostic se fait par radiographie.

Les accidents en saturation étaient toujours des bend diaphysaires (localisé hors articulation), majoritairement localisés au niveau des épaules en lien avec un travail intense avec les membres supérieurs. Quelques uns apparaissaient au niveau des hanches et des genoux.

Il faut bien distinguer le bend de l'ostéonécrose car la relation de cause à effet n'est pas si simple. Si on considère les plongeurs profonds intervenant régulièrement à 200-300 mètres de profondeurs, la fréquence de bend était d'environ 1% ce qui correspondait à peu près à la fréquence d'apparition des ostéonécroses.

Le bend est apparu au moment des plongées à saturation hélium. Une diminution de ce type d'accidents a progressivement eu lieu, notamment en lien avec la diminution des durées de plongées et l'amélioration des tables de plongée.

Accidents vestibulaires

Dans les années 70, au moment de la mise au point des tables He par extrapolation des tables air, des accidents vestibulaires en faible nombre ont eu lieu lors de la transposition en France des tables anglo-saxonnes à l'hélium. Ces accidents n'ont pas lieu en plongée à saturation.

Accidents biochimiques

Des accidents biochimiques ont eu lieu, mais de manière rare et en lien avec une erreur humaine. Il peut s'agir notamment de crise hyperoxique (convulsions) à cause d'une utilisation d'O_2 pur au palier au lieu d'un mélange 50/50. Ces accidents n'ont jamais conduit à des décès.

Autres

Des accidents traumatiques ont également eu lieu suite à la rupture d'un câble, la chute d'une tourelle (3 morts) ou encore une déconnexion accidentelle entre la tourelle de plongée et le caisson créant une décompression explosive du caisson de désaturation (6 morts).

Toxicité de l'oxygène

En lien avec la toxicité à l'oxygène, la COMEX a baissé ses doses d'O2 (par rapport aux anglo-saxons), mais parallèlement, à diminué en vitesse de décompression et augmenté les temps de décompression à vitesse constante.

Depuis 1974 jusqu'à nos jours, les temps de décompression ont été multipliés par 2. Les premières décompressions de saturation à vitesse constante se faisaient à 30 min par mètre, produisaient plus de bulles et surtout prenaient plus de temps. Le fait de passer à des vitesses plus lentes a entrainé une forte diminution du taux de bulles chez les plongeurs associée à une diminution des ostéonécroses chez ces plongeurs (avant fortement liées à des problèmes de décompression trop rapide).

Surveillance

A l'époque, on surveillait les os et les poumons.

Fonction respiratoire :

Il a été constaté une diminution de la capacité vitale ou de la ventilation maximale seconde (VEMS) chez les plongeurs plus marquée chez les plongeurs que celle naturellement liée à l'âge. La combinaison des facteurs tabagisme/hyperoxie/bulles joue un rôle dans ce résultat. Le tabagisme concernait à l'époque environ 50% des plongeurs.

Surveillance neurologique :

Elle se limitait à un électro encéphalogramme (EEG) et était réalisé pour chaque plongeur à l'embauche, puis par la suite, uniquement sur les plongeurs qui faisaient de l'expérimentation. En effet long terme, rien n'est jamais apparu.

Surveillance cardiaque :

Les effets cardiaques n'étaient pas étudiés, mais a priori il n'y en n'avait pas.

Troubles psychiatriques :

Pas d'évaluation psychiatrique à l'embauche ni de suivi de l'état psychiatrique des plongeurs. Mais jamais de souci de ce côté-là.

En Norvège, des troubles neuro-psychiatriques / pertes de mémoire ont été recensés dans les populations d'anciens plongeurs et s'est posée la question de l'imputabilité de ces troubles à la plongée. Pour Bernard Gardette, les anciens plongeurs concernés essayaient surtout d'attiser la polémique car ils avaient porté plainte auprès du ministère du travail norvégien afin d'obtenir des indemnités.

DRASSM - Département des recherches archéologiques subaquatiques et sous-marines

M. Michel L'HOUR – Archéologue sous-marin, Président du DRASSM
Mme Souen FONTAINE – Archéologue au DRASSM
M. Christian PERON – Chargé de mission au DRASSM
Date de l'audition : 28/11/2013
Lieu de l'audition : Marseille

INTRODUCTION

Le DRASSM travaille actuellement sur l'arrêté d'application du Ministère de la culture sur les chantiers de fouilles et les opérations archéologiques, y compris les plongeurs. Dès qu'une autorisation d'opérations archéologiques est délivrée, il y a obligation de se conformer aux procédures définies par le manuel de prévention des opérations hyperbares, à partir du moment où il y a un plongeur qui participe aux opérations.

Pour les opérations se déroulant à l'étranger, les exigences sont à minima celles définies par le manuel de prévention hyperbare à partir du moment où il y a un plongeur du DRASSM qui participe aux opérations.

Au niveau international, la France et le DRASSM sont fondateurs et leaders de la pratique de l'archéologie sous-marine. Une réflexion est en cours sur la mise en place d'un centre de formation archéologue qui intègre la plongée et permette aux plongeurs d'être autonomes.

La convention de l'UNESCO 2001, en cours de ratification dans le monde, est composée d'un comité scientifique et technique de 12 experts mondiaux. Les états se sont donnés pour mission d'organiser dans un premier temps des services spécialisés d'archéologie sous-marine.

DEFINITION DE LA POPULATION PROFESSIONNELLE

Nombre, Classe, Mention des « travailleurs hyperbares » :

L'effectif actuel en France est d'environ 300 plongeurs archéologues classés contre environ 800 dans les années 1980. Ceci est lié au fait que beaucoup de plongeurs archéologues ne sont pas classés actuellement car ils bénéficient des mesures dérogatoires qui ont été mises en place entre 1990 et 1994.

Concernant plus spécifiquement le DRASSM :

- Mention A :
  - Quelques (2 ou 3) travailleurs opérationnels de classe 2
  - 1 travailleur de classe 3

- Mention B :
  - 2 travailleurs de classe 1
  - 12 travailleurs de classe 2 (constituent le gros des troupes)
  - 3 travailleurs de classe 3 (en lien avec une expérience professionnelle antérieure)

L'âge moyen des travailleurs est de 40-45 ans avec des extrêmes allant de 33 ans pour les plus jeunes jusqu'à 60 ans pour les plus âgés. Cet âge « avancé » s'explique par le fait qu'il est nécessaire d'avoir au moins 10 ans d'expérience pour être archéologue sous-marin.

Une vingtaine d'archéologues sous-marins travaillent donc au DRASSM. Ils réalisent 10 à 50 interventions par an ce qui est nettement inférieur au rythme tenu à la fin des années 70, où les archéologues faisaient 200 plongées par an. Cette baisse de fréquence permet de diminuer les conséquences sanitaires liées à l'exposition aux conditions hyperbares. Par ailleurs, les plongeurs n'ont pas un nombre de plongées minimum imposé par an.

La durée d'une carrière est de 30 ans maximum en fonction de l'avis du médecin (perte des compétences de plongée, problèmes d'oreilles…) ce qui équivaut à plus de 10000 heures dans l'eau.

TECHNIQUES D'INTERVENTION EN CONDITIONS HYPERBARES

Les problématiques liées à l'organisation d'un chantier de fouilles archéologiques sous-marines sont très spécifiques.

Il s'agit d'abord de réunir une équipe pluridisciplinaire qui va intervenir simultanément sur le fond. Cette équipe peut-être constituée de 12 à 30 plongeurs (dans le cas d'un chantier à 50 mètres de profondeur par exemple) dont les niveaux techniques sont différents. Plus le site est profond, plus il est nécessaire que les plongeurs soient nombreux car le temps effectif au fond par personne diminue et il faut donc plus de main d'œuvre pour couvrir la même surface.

Les chantiers archéologiques sous-marins sont envisageables jusqu'à 50 mètres de profondeur, mais les plongeurs ont besoin de temps pour travailler. A 50 mètres, le temps est déjà très compté et les plongées suffisamment répétitives. Au-delà de 50 mètres, il n'est plus possible d'envoyer une équipe pluridisciplinaire, le temps est trop comté pour travailler. Pour donner un ordre d'idée, une épave nécessite 5000 à 6000 heures de travail. Pour ces raisons, le DRASSM n'envisage pas de mettre en œuvre des chantiers au-delà de 50 mètres.

SYSTEME DE PLONGEE AUTONOME

Nature des gaz utilisés

- **AIR** : air comprimé

- **OXYGENE** : 100% utilisé pour les paliers de décompression

Oxygène pur en déco aux paliers était utilisé systématiquement dans les années 80, mais maintenant cela dépend des plongées.

- **NITROX** : utilisé en mélange fond depuis peu (mis en place récemment sur le chantier avec la livraison d'un bateau en janvier 2012 qui est équipé pour fournir du Nitrox)

L'utilisation du Nitrox débute et permet aux archéologues de gagner du temps de travail sous l'eau, et également d'économiser de la fatigue. C'est un facteur de sécurité et le DRASSM est actuellement en réflexion sur la banalisation de cette technique

Un point important en termes de sécurité concerne l'homogénéité des techniques de plongée mises en œuvre sur chantier. Dans le cas du nitrox par exemple, soit toute l'équipe plonge au nitrox, soit personne.

Mode de fabrication et modalités d'analyse des gaz :

L'air comprimé est fabriqué sur place à l'aide d'un compresseur embarqué et les gaz et mélanges respiratoires sont achetés tout prêts auprès des fournisseurs.

Tables de décompression

Les tables de décompression utilisées sont celles publiées par le Ministère du travail (profondeur et durée de travail).

Les profils de plongée sont carrés la majorité du temps, donc cela ne pose pas de problème d'utiliser des tables. L'utilisation d'ordinateurs n'est pas envisagée car si chaque archéologue plonge avec son propre ordinateur, cela n'est pas sécuritaire pour le chantier.

NARGUILE + MELANGE

Le bateau livré en 2012 est équipé mais ce n'est pas forcément simple à utiliser sur les chantiers, cela dépend des conditions. C'est une technique utilisable pour des interventions d'opportunité.

Il était utilisé avant pour des chantiers sur des petits fonds (années 1970-1980), mais il s'est avéré qu'en termes de mode opératoire il était finalement plus simple de remonter pour changer de bouteille que de gérer le narguilé.

CAISSON DE DECOMPRESSION

Le bateau ne dispose pas de caisson embarqué, il n'est pas équipé de base, mais il est possible d'en clipper un sur le pont car un emplacement a été prévu à cet effet.

Le DRASSM privilégie une chaîne de secours avec transfert et recompression en milieu hospitalier quand cela est possible et sinon, la location extemporanée d'un caisson permet d'avoir un caisson en bon état de fonctionnement le moment venu.

Maintenance du matériel

Le matériel est individuel.

La maintenance est sous-traitée par Aqualung. Le matériel est retourné directement chez le fabricant qui réalise les opérations de maintenance.

Désinfection

Concernant la désinfection des détendeurs et combinaisons, elle est faite par trempage dans des bacs à septivon. Les procédures ne sont pas vraiment codifiées. C'est un axe d'amélioration et une stratégie de protection des oreilles pourrait notamment être envisagée. En effet, des pathologies/infections de l'oreille sont fréquemment consécutives à des chantiers de plongée se déroulant dans des eaux chaudes et/ou polluées.

Description de l'activité/du type de chantier

Equipe sur le chantier :

Une spécificité de l'archéologie sous-marine concerne les contrôleurs d'opérations hyperbares du DRASSM. Définis par zone géographique, ils peuvent intervenir n'importe quand pour contrôler les chantiers (connaissance des procédures de sécurité, aptitude des plongeurs…). La consigne pour ces contrôleurs étant d'apporter des conseils de bonnes pratiques et de sécurité. Suivant le niveau de gravité des dysfonctionnements relevés sur le chantier, le contrôleur en informe le DRASSM. Le problème le plus fréquent concerne la qualification et l'aptitude des plongeurs, les plongeurs sur le chantier n'ont pas le niveau requis ou disposent de certificats médicaux falsifiés. Le deuxième problème concerne plutôt les chantiers avec peu de moyens et où chacun apporte son matériel pour travailler.

Sur chaque chantier, le chef des opérations hyperbares (COH) assure la sécurité des plongées avec le chef de chantier.

Conditions d'utilisation / Profils de plongée

La plupart du temps, les profils de plongées sont des plongées « carrées ».

Mis à part les équipes de vidéastes et de photographes, tous les plongeurs sur le chantier sont tenus de respecter le manuel des opérations hyperbares.

Formation (personnes et matériel)

Pas de formation codifiée pour l'utilisation du nitrox et de l'oxygène pour les archéologues. Pour cause de vide juridique, il n'est pas obligatoire que les plongeurs soient nécessairement qualifiés nitrox pour plonger avec ce mélange. Mais pour le moment, la procédure d'utilisation du nitrox n'est pas encore très développée au sein du DRASSM et dans l'éventualité de sa généralisation, une procédure de formation des plongeurs est en réflexion.

Pour le moment, c'est du nitrox 35% qui est utilisé, permettant de correspondre aux tables de décompression autorisées par le ministère du travail. Une analyse pré-immersion du nitrox est réalisée. Un compresseur à membrane est disponible sur le bateau mais il peut y avoir des soucis en lien avec la température suivant le lieu du chantier (Corse ou Bretagne par exemple).

Concernant l'oxygène, il y a 30 ans, on faisait des tests d'oxygénation en caisson pour observer les réactions des plongeurs. Ces tests ont été arrêtés quand il a été montré que les réactions à l'hyperoxie était très variable d'un individu à l'autre et imprévisibles.

EFFETS SANITAIRES RECENSES LIES A L'EXPOSITION DES TRAVAILLEURS AUX CONDITIONS HYPERBARES / ACCIDENTOLOGIE

Suivi médical

Le suivi médical des archéologues de plongée est cadré par l'état (c'est d'ailleurs Marc Borgnetta de l'INPP qui assure le suivi des plongeurs du DRASSM). Pour 2 structures associatives très professionnalisées qui travaillent autour du DRASSM (ADRAMAR, ARCHEOS), en cas de problème, ils peuvent venir consulter Marc Borgnetta.

Le suivi des plongeurs archéologues associatifs est beaucoup plus complexe car le cadre réglementaire est différent. Ils ne sont pas soumis à une visite médicale obligatoire et codifiée (médecin et examens imposés à une certaine fréquence). Ils ne veulent pas non plus demander une équivalence de « professionnels » car cela les contraint aux visites médicales hyperbares lourdes définies par la surveillance médicale renforcée.

Des difficultés sont également liées au statut de ces plongeurs qui ne perçoivent pas de salaire mais juridiquement, ne sont pas considérés comme bénévole car l'absence de salaire ne vaut pas bénévolat. Il est considéré qu'il y a un rapport de suggestion d'ordre et que donc ces plongeurs sont soumis au classement professionnel et doivent obligatoirement être soumis à une visite.

Accidentologie

Aucun accident recensé en 150000 heures de plongée et très peu d'incidents.

En 1983, 1 décès par noyade à signaler. Il s'agit d'un plongeur mort au fond par manque de préparation et de formation. Le chantier avait été identifié comme non suffisamment sécurisé.

Un accident de décompression a été signalé sur un chantier à San Diego.

Parmi les facteurs favorisants, l'hygiène de vie est très importante. Le tabagisme est relativement faible parmi les plongeurs archéologues du DRASSM et un ancien plongeur avait problème d'alcool sévère, il ne plonge plus aujourd'hui. Globalement, la nouvelle génération de plongeurs fait plus attention à sa santé : moins de tabagisme, moins de consommation d'alcool et plus d'activités physiques.

Parmi les effets à long terme des plongées, la surdité chez les vieux plongeurs est un phénomène récurrent (hyperacousie) qui est d'ailleurs reconnu en tant que maladie professionnelle.

Un problème propre aux plongeurs archéologues pendant un chantier de fouilles sous-marines est qu'en cas de rhume ou de sinus bouchés, alors que la plongée est contre-indiquée, les archéologues descendent quand même. De part leurs activités sur le chantier sous-marin, les archéologues font du Vasalva.

PRECONISATION POUR AMELIORER LA SECURITE DES TRAVAILLEURS EN MILIEU HYPERBARE AVEC CE TYPE DE MELANGE

Concernant l'usage du recycleur :

Ce matériel n'est pas utilisé au DRASSM et ce n'est pas une pratique qui tend actuellement à être popularisée par le DRASSM. Il s'agit d'un matériel complexe d'utilisation mais également complexe en termes de formation, sécurité et entretien. Au DRASSM, cette technique n'est pas mise en œuvre pour des problèmes de coût et de technicité. Il serait envisageable de l'utiliser à petite échelle, sur un effectif limité de plongeurs, pour réaliser une expertise photographique et archéologique avant le démarrage d'un chantier de fouilles par exemple. Cela devient plus complexe si l'on souhaite faire plonger au recycleur une équipe de 30 personnes.

Dans le contexte actuel, ce n'est pas forcément le matériel dont les archéologues souhaitent développer l'utilisation. Certains archéologues songent à l'utilisation des recycleurs pour certaines opérations (parmi les archéologues se comptent notamment des plongeurs spéléologues rodés à cette pratique).

Par ailleurs, beaucoup de paramètres liés à l'humain et donc difficilement maitrisables (fatigue, problèmes personnels) sont des facteurs favorisants la baisse de vigilance qui ne pardonne pas lors de l'utilisation de ce type d'appareils.

A la connaissance du DRASSM, au niveau international, il n'y a aucun pays qui plonge aux recycleurs dans le cadre de fouilles archéologiques. Peut-être ponctuellement pour descendre sur des épaves, mais pas pour réaliser un chantier de fouilles pluridisciplinaires au sens où l'entend le DRASSM.

Concernant l'apnée :

Cette pratique pourrait être intéressante pour des interventions ponctuelles de type récupération de matériel ou incursion d'opportunité, pour des interventions de bord de plage, mais ne pourrait pas être développée comme instrument de travail dans le cadre d'un chantier de fouilles archéologiques.

Comment appréhender des plongées au-delà de 50 mètres ?

La solution est le développement de robots capables d'atteindre des profondeurs de 2000 à 2500 mètres pour réaliser ce que l'homme ne peut faire. L'avenir réside dans le développement de ces appareils permettant de sonder les grands fond (prévu pour dans 5 ans).

Le ROV est utile aux plongeurs militaires, mais il est encore trop rustre pour les sciences et l'archéologie.

Un projet de mise au point de robots très perfectionnés, capables de réaliser des opérations fines sous l'eau avec un ressenti de l'opérateur en surface est en passe de démarrer (sous réserve de financements). Il est envisagé qu'il puisse descendre à 2000-2500 mètres de profondeurs (en concurrence avec les chalutiers de grands fonds).

FSGT - Fédération sportive gymnique du travail / Hippoconsulting (Organisme de formation de plongeurs et instructeurs aux Mélanges et Recycleur en France et à l'international)

M. Jean-François ANDRE – Moniteur FSGT, Dirigeant de la société Hippoconsulting
Date de l'audition : 27/11/2013
Lieu de l'audition : Marseille

Jean-François André est mention B, classe 2. Formateur professionnel de Plongeurs et de moniteurs Mélanges et Recycleur depuis 15 ans.

ACTIVITES DE LA FSGT ET DESCRIPTIF DE LA POPULATION FORMEE AUX MELANGES ET RECYCLEUR

La Fédération sportive gymnique du travail (FSGT) forme depuis 15 ans des plongeurs à la plongée aux mélanges dont certains sont des plongeurs professionnels. Cela concerne notamment les scaphandriers classés qui travaillent sous l'eau avec des mélanges (mention A, classe 2) et qui viennent se former à l'utilisation des recycleurs. L'obtention de la formation ne leur délivre pas pour autant un droit de la pratiquer dans le cadre professionnel. En effet, en complément des formations reconnues et qualifiantes pour l'utilisation professionnelle des mélanges (trimix, recycleurs…) jugées inadaptées, certains employeurs font faire des formations à leurs employés via la FSGT. Les formations FSGT ne sont pas qualifiantes dans le cadre professionnel mais présentent un intérêt de par leur contenu.

L'autre partie de l'activité concerne la formation des plongeurs et moniteurs de loisir qui viennent à 99% se former aux mélanges et aux recycleurs.

Environ 80 formations annuelles aux recycleurs, tous gaz confondus sont dispensées. Les formations concernent l'utilisation de recycleurs en environnement immergé, pas de formation au sec.

Parmi les plongeurs formés, 10 à 15% sont des professionnels classés. Les travailleurs qui viennent suivre des formations appartiennent à la mention B, classe 2 et quelques uns à la mention A, classe 2. Pas de demande de la part des travailleurs de la classe 3. Ce sont beaucoup des anciens militaires qui souhaitent comprendre le fonctionnement des appareils.

- **Mention A, classe 2** :
  - Scaphandriers : pour les petits travaux, l'expertise mais également du « vrai » travail de scaphandrier (durée d'immersion de 2 heures)
- **Mention B, classe 2** :
  - Vidéastes (durée d'immersion de 2 heures en moyenne)
  - Scientifiques (durée d'immersion de 2 heures en moyenne)
  - Biologistes (durée d'immersion de 2 heures en moyenne)
  - Pêcheurs (formation pour une question de rentabilité, pêche à la roche vivante, aux violets sur le plateau des Aresquiers, plongée jusqu'à 20 mètres, plongent 3-4 heures tous les matins)

L'âge moyen des « travailleurs hyperbares » qui viennent se faire former est d'environ **30-35 ans** avec des extrêmes allant de 20-22 ans pour les plus jeunes jusqu'à 40 ans pour les plus âgés.

TECHNIQUES D'INTERVENTION EN CONDITIONS HYPERBARES

Contexte des demandes de formation pour les scaphandriers

Les entreprises de travaux immergés n'ont plus l'autorisation d'utiliser de SCUBA. Elles souhaiteraient que leurs scaphandriers puissent utiliser un recycleur dans les conditions où le narguilé n'est pas adapté, au moins dans la tranche 0-50 mètres voire même au-delà (à des profondeurs maximales de 120 mètres pour faire des photos et expertises). En revanche, elles ne souhaitent pas utiliser de matériel aussi sophistiqué que les recycleurs dans le cas de travaux complexes. Hormis toutes les interventions réalisées avec des outillages lourds, le reste des opérations sont réalisées aux mélanges et aux recycleurs. Les entreprises de TP qui sollicitent ces formations sont plutôt des indépendants qui travaillent en mer et dans les eaux intérieures.

Pour les scaphandriers, les formations sont adaptées suivant la demande :

1) Choix des plages de profondeurs dans lesquelles les travailleurs vont être amenés à intervenir ;

2) Détermination des mélanges à utiliser, des durées d'intervention et des tables, suivie d'une préparation des mélanges et configurations types applicables suivant les différentes situations de plongée envisagées ;

3) Les profils de plongée sont cadrés par les 2 points précédents. Il faut fixer des limites en termes de durée d'immersion et fixer des protocoles.

Conditions d'utilisation des recycleurs

Les demandes d'utilisation du recycleur concernent les photographies, le travail d'expertise ou le petit travail de boulonnage.

L'objectif de l'utilisation des recycleurs peut être certes l'augmentation de la durée de plongée, mais les bénéfices sont importants en termes de sécurité et de forme physique des plongeurs.

Sur du travail physique, il est possible d'avoir l'attention suffisante pour contrôler ses paramètres, l'employeur choisit les plongeurs qu'il juge apte de plonger dans ces conditions. A partir de 40 mètres, c'est une plongée plus sécurisée. Par contre, la profondeur limite d'utilisation pour ce type d'activité doit être limitée à 60 mètres, de la même façon que les limites encadrant la plongée bouteille.

Profondeurs d'intervention

Concernant les profondeurs maximum autorisées, pour les photos, le travail d'expertise ou le petit travail de boulonnage, les travailleurs peuvent descendre jusqu'à 120 mètres.

Les grandes plages de profondeurs sont définies comme suit :

- 0 à 40 mètres
- 40 à 60 mètres
- 60 à 80 mètres
- Au-delà de 80 mètres

L'usage du recycleur sécurise la plongée à partir de 60 mètres de profondeur (également dès l'immersion).

Mais attention, pour travailler avec un recycleur, il y a une « respiration » à trouver. Cet apprentissage fait partie de la formation.

Recycleurs : considérations techniques

Type de recycleurs utilisés en formation

Souvent, les élèves n'ont pas d'appareils lorsqu'ils viennent en formation.

Le matériel de l'école pour les recycleurs à circuit fermé sont des Submatix (matériel allemand). C'est un appareil simple d'utilisation qu'il est possible de passer en mode manuel en cas de problème électronique. Il existe plusieurs modes dégradés lorsque le plongeur passe en mode manuel et qui sont des modes de fonctionnement à part entière.

Pour le modèle de décompression, un ordinateur est vendu avec la machine (à mettre au poignet dans certains cas). Enclenché en mode ON, il gère l'électronique mais il est possible de le mettre en mode OFF et de fonctionner en mode mécanique. 4 cellules O2 sont disponibles de base sur l'appareil.

La machine dispose d'une autre prise sur laquelle on peut brancher un autre ordinateur ou d'autres afficheurs. Il est possible de connecter un deuxième ordinateur sur les mêmes cellules O2 que l'autre ou mettre 3 cellules O2 supplémentaires sur l'ordinateur esclave et 3 cellules sur l'ordinateur pilote ce qui offre une vraie redondance.

Les afficheurs sont aussi indépendants en termes de piles, d'écran et de cellules.

L'objectif dans la conception est d'avoir la meilleure autonomie possible des différents systèmes qui composent le recycleurs les uns par rapport aux autres.

Coût de l'appareil ; 7300 euros (prêt à plonger). Tous les recycleurs sont presque au même tarif.

Modèle de décompression utilisé :

Mathieu Coulange demande quels seraient les critères à prendre en compte pour choisir son modèle de décompression. Si l'empirisme est très intéressant et que dans la pratique, tout le monde utilise globalement le même modèle en faisant varier certains paramètres, il demande vers quelles pistes il faudrait s'orienter pour objectiver le choix d'un modèle.

Jean-François André répond qu'en premier lieu, la compréhension du fonctionnement d'un ordinateur et des tables de plongée est le minimum requis. Dans les faits, beaucoup de plongeurs tous publics confondus utilisent des ordinateurs de plongée pour planifier leur plongée sans rien y comprendre. Pendant la formation, Jean-François André dispense des explications « simples » et schématiques sur le principe et le mode de calcul d'un gradient factor (GF) (document transmis « GF pour les nuls »).

Concernant la gestion de la PPO2 en application professionnelle, il faut être sur le fond entre 1,2 et 1,3 bars de PPO2 et aux paliers, s'arrêter au niveau de la limite réglementaire (avec recycleurs, difficile de dépasser 1,5 bars aux paliers).

Concernant la gestion de la PPO2 à la décompression en mode mécanique, un ordinateur peut être connecté sur l'appareil et donner une lecture de la PPO2. Les plongeurs doivent apprendre à rester dans les plages de PPO2 définies avant la plongée.

Dans le cadre d'une application professionnelle, il faut trouver des solutions simples, que les plongeurs enregistrent des instructions claires et faciles à appliquer pendant le travail sous l'eau et leur permettant de rester en sécurité.

Fournisseur de cellules O2 (Analatycal industries):

Jean-François André, qui effectue entre 250 et 300 plongées annuelles en recycleur, change de cellules O_2 tous les 1,5 an environ. En revanche, dès qu'il a un doute sur une cellule, elle est remplacée sans hésitation.

Les cellules O2 sont très fragiles, mais la fiabilité de ces pièces a tendance à s'améliorer ces dernières années.

On peut avoir au maximum 7 cellules oxygène sur l'appareil utilisé lors des formations.

Recycleur et ergonomie au poste de travail :

Attention à anticiper la posture de travail du plongeur qui utilise un recycleur. En effet, son activité peut être gênée par le positionnement des faux-poumons de l'appareil. Sur le Submatrix, la position des faux-poumons est très postérieure, ils sont collés dans le dos en forme de U. Une démarche de positionnement plus antérieure des faux-poumons pourrait être nécessaire. C'est par exemple le cas pour les corailleurs qui de par leur activité sont gênés par ce positionnement.

La position des faux-poumons est justement mise en cause dans la recrudescence récente des accidents cardio-vasculaires d'immersion. Jean-François André a fait un article dans le magasine Octopus sur ce sujet et précise que ces effets concerneraient plutôt des plongeurs loisir qui ne sont pas en aussi bonne condition physique que les plongeurs professionnels.

Concernant le poids et le volume de l'appareil, 2 modèles du même recycleur existent :

- L'un dont le poids est de 20 kg environ (prêt à plonger),
- L'autre dont le poids avoisine les 30-35 kg (prêt à plonger),

C'est principalement le canister de chaux sodée qui diffère d'un modèle à l'autre. Dans le cas du modèle le plus lourd, le canister est double vitré, c'est-à-dire que la chaux n'est jamais au contact de l'eau et ceci dans l'objectif de faire mieux travailler la chaux dans des conditions froides. C'est cette conception du canister qui fait que l'appareil pèse 10 kg supplémentaires. Le volume du sac est de 10 litres.

Maintenance du matériel

La maintenance est simple,

- 2 plaques électroniques : une dans l'ordinateur et une dans la tête du recycleur ;
- un capteur de pression ;
- un solénoïde.

La maintenance peut être assurée par les plongeurs eux-mêmes sous réserve d'une sensibilisation individuelle. Des stages sont possibles pour permettre aux utilisateurs avertis d'apprendre à maintenir eux-mêmes leur matériel et à changer les plaques électroniques par exemple.

Selon la notice d'utilisation, la fréquence des contrôles doit être annuelle (vérification des joints apparents et des cellules O2). Mais des contrôles visuels simples peuvent être réalisés de manière hebdomadaire. Le taux d'usure d'un recycleur est relativement réduit (cellules, joints, tuyaux…) et la maintenance annuelle de l'appareil coûte au maximum 500 euros.

Avant plongée :

Il y a une procédure de mise en plongée dictée par l'ordinateur. A l'allumage, l'ordinateur vérifie si les capteurs sont connectés et dans des bonnes plages de valeurs. Calibrage dans un premier temps à l'air, procédure d'injection d'oxygène puis l'ordinateur déclare le système prêt à plonger. La procédure de mise en service dure environ 30 minutes s'il faut tout préparer (voire 15 minutes si la chaux est déjà remplie et les blocs gonflés).

Après plongée :

La procédure de reconditionnement dure environ 15 minutes. Le stockage doit être fait de préférence dans des locaux secs pour prévenir le vieillissement des cellules O2. Si le local de

stockage est humide, la boucle doit être bien séchée et comme il n'est pas judicieux de l'aérer dans cet endroit, il vaut mieux remonter l'appareil.

Prophylaxie :

Les utilisateurs sont sensibilisés à la désinfection de leur matériel. Au minimum, désinfection de la boucle du recycleur par passage dans un bain de désinfectant, mais ce n'est pas fait à chaque plongée. Il faudrait au minimum rincer le matériel à l'eau fraiche.

Intérêt de concevoir l'appareil avec des pièces « standard », notamment pour certaines pièces plus fragiles, comme les connecteurs, ce qui permet de trouver plus facilement (et n'importe où dans le monde) une pièce de remplacement en cas de casse ou d'usure.

Limite de l'appareil « recycleur » /améliorations à envisager :

Actuellement, considérant l'appareil d'un point de vue matériel, il n'y a rien à changer.

Il faudrait peut-être améliorer l'ergonomie de l'appareil qui peut être source d'erreurs. Par exemple, pour changer la PPO_2 sous l'eau, les manipulations ne sont pas nécessairement intuitives. Ce sont des pistes d'amélioration. Une mise à jour en ce sens a été faite a été réalisée dernièrement.

Dans le cadre d'une procédure de secours sous l'eau, le fait de pouvoir basculer sur le BOV (bail-out valve) n'est pas une solution idéale. C'est un système qui permet de fermer l'embout du recycleur et de passer en circuit ouvert mais d'une part, il doit être réglé suivant la profondeur à laquelle le plongeur descend et d'autre part, c'est un système au point mais qui est très dépendant, en termes de sécurité, de l'utilisation que la personne en fait. Cela peut notamment poser un problème de sécurité en fonction du gaz diluant utilisé. S'il s'agit d'un diluant normoxique, il n'y a pas de problème, mais en cas de diluant hypoxique, une erreur de manipulation du matériel peut conduire au déclenchement d'une crise hypoxique (confusion des 2 sources d'alimentation). Les plongeurs qui ne se font pas confiance ont tendance à débrancher ce système pour ne pas risquer la crise hypoxique (et le décès) en cas d'erreur.

Avis de Jean-François André sur le triton de M3S :

C'est un modèle mécanique. Il manque de la redondance sur cet appareil (seulement 3 cellules). Tout dépend du domaine dans lequel il va être utilisé.

Il diffère principalement par la position des faux-poumons placés sur le ventre ce qui est intéressant dans le domaine de la spéléologie et des vidéastes mais beaucoup plus complexe dans les autres secteurs professionnels type travaux sous-marins.

Recycleur et procédures de sécurité :

- **Utilisation d'une sangle d'embout, plutôt sous forme de scratch**

Jean-François André est favorable à l'utilisation d'une sangle d'embout sous réserve d'apprendre aux plongeurs comment bien s'en servir. Il préconise d'utiliser un scratch plutôt que les sangles d'embout compliquées qu'utilisent les militaires et qui peuvent, selon lui, être sources d'accidents.

- **Utilisation conjointe d'une sangle d'embout et d'un BOV**

Un BOV est un détendeur intégré dans le recycleur, c'est un système intégré de secours. Théoriquement, l'utilisation conjointe d'une sangle d'embout et d'un BOV est idéale en termes de sécurité mais dans la pratique ce n'est pas aussi simple. Cela dépend du type de gaz diluant utilisé (normoxique ou hypoxique). Cette solution semble potentiellement intéressante dans un contexte professionnel.

Critères de choix d'un recycleur pour un usage professionnel :

Tous les types de recycleurs disponibles sur le marché sont globalement équivalents. D'un modèle de recycleur à l'autre vont différer le poids, la position des faux poumons, les opérations de maintenance nécessaires, les pièces propriétaires ou non…

Plusieurs critères sont proposés pour choisir le matériel à visée professionnelle le plus adéquat :

- Il faut des appareils rustiques très solides, de type DC 55 civils
- La norme CE est obligatoire et défini le minimum requis pour un appareil
- Jean-François André préconise d'opter pour du matériel européen pour faciliter la maintenance et le suivi ainsi que le renouvellement de pièces le cas échéant.

Mise à disposition de matériel par l'entreprise

Un appareil = un homme ; chacun est responsable de sa maintenance de sa préparation.

Pour des petites entreprises, il est envisageable de disposer d'un pool de 3-4 machines qui peuvent être utilisées par plusieurs travailleurs différents sous réserve que l'utilisateur fasse lui-même au moment de l'utilisation, la mise en service et le reconditionnement de l'appareil.

Formation à l'utilisation des recycleurs :

Procédure d'achat d'un recycleur

En France, le suivi d'une formation pour utiliser un recycleur n'est pas obligatoire pour son achat. L'achat d'une formation n'est pas imposé réglementairement au moment de l'achat d'un recycleur. Il est cependant possible de suivre une formation d'apprentissage de l'utilisation d'un appareil, d'une semaine environ (suivant la complexité des mélanges). Dans d'autres pays, le matériel est vendu avec une pièce manquante qui est envoyée une fois la formation d'apprentissage d'utilisation validée.

Jean-François André de son côté a pris le parti de ne pas vendre d'appareil si les plongeurs ne suivent pas la formation. Coût de la formation, 1100 euros pour une semaine de formation (1 formateur pour 2 élèves maximum). En Angleterre c'est une obligation (TDI, PADI). Un fichier sur internet recense l'instructeur référent ayant dispensé la formation et l'état de maintenance de l'appareil. Le droit français n'oblige pas à faire ça.

Les écoles de formation travaillent avec les fabricants de recycleurs pour mettre au point une procédure qui certifie la formation des personnes (validation par la fabriquant de l'instructeur référent et de l'élève).

Si certains centres de formation pouvaient disposer d'un label « formateur recycleurs » reconnu par l'état, cela serait bien.

Organisation des formations :

Officiellement, il n'y a plus besoin de pré-requis pour accéder à ces formations. Ce n'est pas uniquement une question de niveau de plongée car le recycleur nécessite une remise en question de ses acquis en plongée pour appréhender une nouvelle façon d'évoluer sous l'eau.

L'organisation par la FSGT des formations à visée professionnelle est faite de la manière suivante : Il s'agit d'abord de former les chefs d'équipe qui vont commencer à mettre en œuvre ces nouvelles techniques et dans un second temps, former les plongeurs qui vont pouvoir commencer à plonger avec les chefs d'équipe (l'expérience du chef d'équipe est bénéfique en termes de sécurité).

Mettre en place une première phase de formation continue sur 3 ans, avec accompagnement tous les 6 mois puis dans un second temps, instaurer un recyclage tous les 3 ans.

D'après Jean-François André, quelqu'un qui n'a jamais plongé au recycleur sera opérationnel et surtout en sécurité, au bout d'un an environ ; au-delà de la durée, le nombre d'immersions est bien sûr très important.

Formation aux procédures de secours :

Dans la majorité des situations, en cas de problème, il faut préconiser un passage sur le système de secours (bail-out) et une remontée du plongeur. C'est par exemple le cas pour un scaphandrier qui en cas de problème, est formé à suivre une procédure de remontée bien définie.

S'il s'agit d'un moniteur en revanche, en cas de problème, il a besoin d'une marge de manœuvre plus importante car il va encadrer des élèves qui seront sous sa responsabilité, il sera donc formé différemment.

Pour une utilisation professionnelle, il faut mettre en place des systèmes d'alarme pertinents sur l'appareil, par exemple une alarme basse à 0,4 bars pour la PPO2 avec une alerte sonore quand le plongeur descend en dessous de cette valeur.

Animation de formations à l'étranger :

Jean-François André dispense ces formations à l'étranger environ 4 mois par an et cette activité tend à augmenter. Globalement les demandes de formations sont les mêmes que celles dispensées en France, sauf des formations plus spécifiques par exemple aux gaz blenders à la fabrication de mélanges demandées pour travailler sur des plateformes en Algérie. Demande de formation par les biologistes (Polynésie).

Les programmes étant personnalisés, la majorité des gens réussissent la formation, le plus difficile est de leur fixer des limites.

Remise à niveau des connaissances :

Pour l'utilisation des recycleurs, pour rester au niveau, il faudrait théoriquement pratiquer tout le temps…

Que préconiser par exemple dans le cadre de la plongée scientifique pour maintenir son aptitude ?

- Imposer des temps de plongée minimum ;
- Définir une procédure de reprise d'activité accompagnée (recyclage) ;
- Définir une progressivité de reprise de profondeur en cas d'arrêt prolongé.

Si quelqu'un n'a pas pratiqué pendant 6 mois, se rapprocher du formateur d'origine pour faire un recyclage simple des connaissances. Instaurer une reprise progressive en termes de profondeur de 10 en 10 mètres à partir de 30 mètres.

Le formateur peut proposer, sous réserve de la disponibilité géographique des plongeurs, une vérification des acquis et une remise à niveau des connaissances tous les 6 mois, surtout au début. C'est une forme d'accompagnement pour démarrer dans ce type d'activité. Dans un second temps, il faudra des recyclages.

Imposer des laps de temps (heure de plongée obligatoires à faire) entre le passage de niveaux pour permettre d'intégrer les notions (entre 50 et 100 heures). Car certains veulent aller trop vite, trop profond (moins le cas chez les professionnels).

Organisation de la sécurité:

En formation

Toujours une sécurité surface, une personne capable de s'immerger à la profondeur à laquelle a lieu la formation (peu importe la technique). A la FSGT, toutes les immersions se font avec un formateur sous l'eau. Il n'y a pas de plongeur de secours en tant que tel. Lors de plongées engagées ou longues, une personne descend aux paliers pour vérifier que tout se passe bien.

Comment transposer cette organisation en conditions professionnelles ?

Dans l'idéal, il faudrait en surface une personne qui fasse un contrôle fond via vidéo et ROV et un plongeur secours qui soit capable de s'immerger pour intervenir si besoin. Dans le cas de plongées fixes, il faut également mettre en place une ligne de vie. Avant la plongée, il faut connaitre la profondeur maximale et la durée de l'intervention.

Actuellement en plongée professionnelle, la *durée maximale d'intervention* est fixée à 3 heures pour la mention A et à 6 heures pour la mention B. Jean-François André trouve que ces durées sont bien déterminées.

La décompression à l'oxygène en surface est-elle compatible avec un recycleur? Etant donné que l'option de faire une déco en caisson surface n'est pas judicieuse (sauf protocole de secours spécifique), il est possible d'utiliser le recycleur en surface pour dispenser de l'O2 et faire de la déco (les systèmes Veinol, interdits en France sont des systèmes non immergeables qui permettent de délivrer de l'oxygène en surface).

L'utilisation d'un recycleur en secours permet un délai de survie plus important en attendant les secours et offre plus de temps en surface pour gérer la situation. Le recycleur offre une autonomie plus importante au plongeur en attendant les secours.

ACCIDENTOLOGIE RECYCLEURS :

- 3 accidents mortels en loisir avec le modèle SMS100
  - 1 accident cardio-vasculaire diagnostiqué à tort comme AVC chez une personne de 65 ans, cardiaque et médicamentée (plongée de 70 mètres). L'analyse rétrospective a montré un crachat rosé en surface (signe de toxicité de l'oxygène).
  - 1 erreur de manipulation en formation : l'accident a eu lieu en conditions de plongée difficiles avec une visibilité mauvaise et du courant, l'élève en formation avait dans sa bouteille du gaz hypoxique alors qu'il était en formation normoxique. L'élève a fait une crise hypoxique dans des conditions difficiles qui ont conduit à sa noyade.
  - 1 erreur de manipulation en piscine dans 3 mètres d'eau. Déclenchement d'une crise hypoxique chez un élève qui s'est terminée en arrêt cardiaque.

- Accidents de désaturation : rares avec ce type d'appareils

- Attention à la déshydratation sur les plongées longues d'environ 3 heures à 120 mètres (Trimix ou Héliox). Le système permet de s'hydrater facilement, mais encore faut-il avoir le réflexe de le faire.

  Dans le cadre professionnel, la plongée au trimix est mieux indiquée car la vitesse de remontée à l'héliox est compliquée et plus technique à gérer. Néanmoins, le trimix pose des problèmes de déshydratation car avec le recycleur, il n'y a pas d'apparition de sensation de

soif. Le plongeur est donc confortable pour sa plongée mais doit faire attention à ne pas trop prendre ses aises.

- Problèmes neurologiques : en formation, il est utile de sensibiliser les plongeurs à ce type de problèmes pour leur faire comprendre ce que c'est, comment ils peuvent survenir et leur éviter de paniquer sous l'eau en cas d'alerte.

Historique : Jean-François André est président de l'AHR (avenir et histoire des recycleurs).

Attention, il est nécessaire de connaitre le déroulement de tous le processus pour comprendre les causes réelles d'un accident (détail de la procédure pour comprendre l'accident).

Attention à l'utilisation du nitrox qui est un facteur d'accident de désaturation, mais c'est plus un problème de formation des plongeurs loisir que de gaz en lui-même.

Pas de problème concernant le solénoïde relevé avec le Submatix. Le solénoïde s'ouvre devant une buse calibrée ce qui permet en toutes circonstances de limiter le débit d'O2 (à 4 litres), limitant la montée de la PPO2 en cas de panne. Ce n'est pas une stratégie très développée dans les appareils. Cela est rendu possible car la machine Submatix fonctionne à la fois sur un mode électronique et mécanique.

L'intérêt d'utiliser des systèmes mécaniques dans le cadre professionnel est discutable car les travailleurs ne font pas suffisamment attention.

Pour obtenir les chiffrages représentatifs en termes d'accidentologie comparative, il faudrait faire le ratio à niveau de pratique équivalent entre la pratique et l'accidentologie liées aux recycleurs versus la plongée en circuit ouvert.

PRECONISATIONS POUR AMELIORER LA SECURITE DES TRAVAILLEURS EN MILIEU HYPERBARE

Utilisation du recycleur en plongée professionnelle

Mesures de sécurité :

- Il est indispensable de plonger en binôme ou à minima d'avoir un contrôle visuel du plongeur immergé

Choix de l'appareil :

En termes de coût d'appareil, il faut rester aux environs de 7000 euros si on veut avoir du matériel solide.

Formation :

→Lors de la formation à l'usage de ces matériels, il n'y a pas de formation au travail sous l'eau. En revanche, les formateurs se renseignent sur le type de travaux que vont être amenés à faire leurs élèves et vont adapter la formation en ce sens.

→ Lors de l'apprentissage de leur activité de travail sous l'eau, les plongeurs doivent être formés avec l'utilisation du recycleur. Il y a en effet un impact de la ventilation (accrue en cas d'effort) sur l'utilisation de cet appareil, une « respiration » à trouver avec le recycleur.

- 1ère respiration : appréhender l'utilisation du détendeur (différent d'un détendeur classique)
- 2ème respiration : trouver sa respiration associée à l'effort, à l'activité de travail.

En France, les infrastructures existantes sont adaptées pour gérer les demandes potentielles de formation recycleur qui pourraient survenir si une utilisation de ce matériel dans le cadre professionnel venait à se développer.

Domaines incompatibles avec l'usage du recycleur :

- Activités nécessitant un outillage important ou des vibrations, dans le cas notamment de l'utilisation de gros outils hydrauliques (marteaux piqueurs).

Proposition d'une organisation pour la mise en œuvre des recycleurs dans le cadre professionnel :

1) Formation générique aux recycleurs dans le cadre d'une utilisation professionnelle, commune à toutes les machines (planification, entretien, désinfection…) dispensée par un organisme certifié par l'état ;
2) Les particularités d'utilisation d'un type de recycleur donné sont définies par le guide d'utilisation fourni par le fabriquant et enseignées dans un organisme de formation certifié sous forme de « spécialités » ;
3) La maintenance des appareils et l'entrainement des personnels sont sous la responsabilité de l'employeur ;
4) Les procédures d'utilisation sont définies par l'employeur.

Réflexion sur la possibilité d'obtenir un permis professionnel pour l'achat/utilisation d'un recycleur.

Autres…

<u>En circuit ouvert</u>, l'utilisation du **trimix normoxique** est **à préconiser dès 40 mètres** (pour ceux qui ont les moyens car l'hélium coûte très cher) ou sinon au moins **à partir de 50 mètres**.

Attention, il **ne faut pas plonger à l'air entre 50 et 60 mètres** (pour cela il faut ouvrir la classe 3).

Il serait bon de **faciliter l'accès des plongeurs professionnels aux différentes formations** (mélanges, recycleurs…).

IFREMER - Institut français de recherche pour l'exploitation de la mer (Laboratoire Environnement Ressources Provence-Azur-Corse)

M. Stéphane SARTORETTO – Docteur en écologie marine, Cadre de Recherche à l'IFREMER
Date de l'audition : 28/11/2013
Lieu de l'audition : Marseille

L'IFREMER dispose de 2 gros centres de recherches à Brest et à Nantes concernant notamment l'étude des microalgues et des canyons profonds.

L'institut dispose d'une flotte européenne de plusieurs bateaux, les plus importants étant le « pourquoi pas » (le plus gros bateau océanographique de la flotte européenne) et l'Atalante qui sont rattachés à la société GENAVIR et disposent de caissons embarqués. Ces bateaux sont utilisés pour la mise en œuvre d'opérations de plongée sous-marine, pour la mise en œuvre du sous-marin le Nautile ou encore de robots télé-opérés (ROV) comme le Victor 6000.

Il dispose également de bateaux côtiers comme l'« Europe », qui mettent en œuvre des opérations de plongée sous-marine mais n'ont pas de caisson à bord. Sur les côtes françaises, les systèmes d'évacuations vers les caissons hospitaliers sont bien identifiés, mais cela est plus complexe lors des opérations à l'étranger.

DEFINITION DE LA POPULATION PROFESSIONNELLE

Nombre, Classe, Mention des « travailleurs hyperbares »

Sur les 2000 personnes travaillant à l'IFREMER, une cinquantaine de personnes plongent, dont les 3 quarts sont basés sur la Méditerranée, à Toulon et à Sète. Les activités de plongée étaient jusqu'à présentes entre 0 et 40 mètres de profondeur.

Les plongées scientifiques commencent à être sous-traitées auprès d'associations. Le nouveau décret à restreint les profondeurs de plongée pour les travailleurs de la mention B :

- Mention B, classe 1 : limitation à 30 mètres
- Mention B, classe 2 : limitation à 50 mètres

Les plongeurs recrutés au niveau des associations sont là pour assurer le respect de la réglementation en termes de nombres de plongeurs et des fonctions imposées sur un chantier de plongée (plongeurs secours en surface, photographes…).

Les plongeurs scientifiques de l'IFREMER Méditerranée et de la Réunion appartiennent à la mention B. Ils sont répartis de la manière suivante (ces proportions sont extrapolables au niveau national) :

- 18 travailleurs de la classe 1 (80%)
- 4 travailleurs de la classe 2 (20%)
- 1 travailleur de la classe 3 (Stéphane Sartoretto est le seul 3B de l'IFREMER)

Le nombre de plongeurs de la classe 2B est en cours d'évolution puisque des demandes d'équivalences sont en cours pour faire passer les plongeurs de la classe 1B en classe 2B. Ceci est lié au fait que 95% des plongées se font entre 0 et 40 mètres et qu'avec la limitation de la

classe 1 à 30 mètres instaurée par le nouveau décret, l'IFREMER manque de plongeurs qualifiés réglementairement pour descendre à 40 mètres.

Par ailleurs, une ambigüité au niveau des textes réglementaires spécifie qu'un plongeur de classe 1B peut dépasser de 10 mètres la profondeur maximale autorisée « à titre exceptionnel », mais sans préciser ce que signifie « exceptionnel ». Est-ce dans le cadre d'une intervention de secours ? Est-ce que la récupération exceptionnelle d'un appareil tombé en panne peut entrer dans cette définition ?

Parmi les plongeurs de l'IFREMER, on distingue 2 types de populations :

- Les plongeurs confirmés (à côté sont des moniteurs de plongée qui plongent depuis 10-15 ans…)
- Les autres qui plongent beaucoup moins, ont moins d'expérience et sont donc moins à l'aise en interventions.

Tentative au sein de l'IFREMER de mettre en place des plongées d'entrainement, mais les emplois du temps des uns et des autres étant très chargés, cela n'a pas pu aboutir. Le problème vient du fait qu'il n'y a pas de nombre imposé de plongée à l'année à l'IFREMER.

Le décret de 2011 a mis en place une nouvelle activité obligatoire dans les entreprises : le conseiller aux activités hyperbares. Pour le moment un flou demeure encore sur ce poste. Qui pour l'occuper ? Quelles seront ses activités, ses missions ? Comment sera-t-il formé ? Sera-t-il nommé au niveau national ou de l'employeur ? Beaucoup d'entreprises les ont par ailleurs déjà nommés même sans avoir encore de précisions sur ces questions.

Mathieu Coulange précise qu'il s'agit quoi qu'il en soit, d'une démarche intéressante puisqu'on intègre dans la partie sécurité, santé au travail en plus des aspects médicaux, également les considérations techniques.

Concernant le suivi médical des travailleurs,

1) Il n'est plus possible de définir par la loi le contenu d'une visite d'aptitude.
2) Jusqu'à présent, les examens prescrits étaient calibrés par les techniques médicales (d'imageries notamment) utilisées il y a 20 ans et qui ont depuis évolué.
3) C'est théoriquement le rôle de la Société française de médecine du travail de produire des règles de bonnes pratiques concernant les examens médicaux à réaliser pour le suivi médical des professionnels intervenant en conditions hyperbares, mais dans la pratique, c'est un groupe de travail parallèle de médecins qui s'occupe d'élaborer ces recommandations de bonne pratiques d'ici la fin de l'année 2014.

L'âge moyen des plongeurs est d'environ 35 ans.

Au niveau national, le nombre de plongeurs est estimé à environ 30 à 40 personnes.

Les plongeurs interviennent en moyenne sur 30 à 40 plongées par an et travaillent à ces postes environ 10 ans.

TECHNIQUES D'INTERVENTION EN CONDITIONS HYPERBARES

La plongée est utile au sein d'IFREMER pour les activités suivantes :

- la mise en place de dispositifs expérimentaux et instruments de mesures ;
- des prélèvements ponctuels d'organismes vivants et de sédiments ;
- l'étude des écosystèmes marins en mer ouverte.

Les zones d'intervention sont assez aléatoires. Compte tenu des missions confiées à l'institut, un nombre significatif de plongées se déroulent près de sources de pollutions (rejets, égouts) ou dans des conditions de turbidité particulière (ex: Golfe de Fos, eaux du Golfe du Lion).

La majorité des interventions "profondes"(40-60m) se déroulent en Méditerranée et concernent environ une dizaine de personnes.

Stéphane Sartoretto décrit ensuite plus particulièrement les activités de l'IFREMER en Méditerranée :

- **SCUBA (circuit-ouvert)**

Les avantages du Scuba en Circuit ouvert sont sa facilité de mise en œuvre et le fait que c'est une pratique relativement peu onéreuse dans le cas de plongée à l'air.

→Air comprimé

L'utilisation de Scuba en circuit-ouvert à l'air concerne l'ensemble des plongeurs en Méditerranée, 30 à 40 personnes. La fréquence d'intervention en scaphandre autonome en circuit ouvert est de 2 plongées par semaine en moyenne.

Les milieux d'intervention sont la mer ouverte/lagunes, notamment près des égouts, ce qui pose un certain nombre de contraintes sanitaires. Les plongées ont lieu à une profondeur moyenne de 20 mètres avec un maximum de 60 mètres. La durée d'immersion s'étend de 30 à 60min.

Sur le site de Sète, 80% des plongées ont lieu dans la zone de profondeur entre 0 et 10 mètres puisqu'ils plongent essentiellement dans les étangs (cartographie de l'étang de Tau : algues, plans de prélèvements des sédiments…) avec des durées d'immersion de 1 à 2 heures en yoyo. Les activités de plongée à la Réunion et en Nouvelle Calédonie sont similaires (entre 0 et 10 mètres). Pour ces activités, se pose la question du développement de la pratique de l'apnée puisque la zone de plongée est peu profonde et que les tâches ne sont pas complexes.

→Décompression à l'oxygène

Actuellement, on observe une extension des activités de plongée de l'IFREMER, les plongées saturantes à 35 à 40 mètres qui étaient peu courantes, deviennent plus fréquentes et impliquent l'utilisation de décompression à l'O_2 pur (ligne de paliers) sur bouée dérivante.

Lorsque les plongeurs font une décompression à l'oxygène, ils utilisent la table MT, air-oxy6 mètres, jamais d'ordinateur de plongée.

En revanche, sur les autres types d'interventions plus courtes et moins profondes, qu'il est difficile de planifier précisément, les plongeurs scientifiques utilisent des ordinateurs de plongée.

→Nitrox

Les plongeurs souhaiteraient avoir la possibilité d'utiliser du Nitrox (32-36%) en mélange fond. Cela présenterait un intérêt pour 5 à 6 % des plongées et permettrait d'adapter certains protocoles.

Son utilisation concernerait une dizaine de personnes et nécessiterait une qualification des détendeurs au Nitrox.

→Trimix normoxique

Les mélanges Trimix ne sont pas utilisés, mais pourraient présenter un intérêt sur des incursions courtes profondes dans la tranche 50-70 mètres pour aller chercher ou déposer un capteur, faire un prélèvement ponctuel.

- **RECYCLEUR**

Stéphane Sartoretto n'a pas d'expérience de l'utilisation de ce type de matériel.

A l'IFREMER, son utilisation pourrait intéresser environ 10 à 15 plongeurs pour l'observation de poissons dans la zone 0-50 mètres, notamment puisque cet appareil ne produit pas de bulles.

Plusieurs points bloquent pour le moment le développement de cette technique à l'IFREMER. Le premier frein étant d'abord le fait qu'il faut une préparation importante du matériel (composants électroniques) en amont de la plongée et ensuite, que l'usage de ces matériels électroniques laisse peu de marge de manœuvre en cas de défaillance et cela constitue à priori un risque trop important pour les travailleurs.

Un autre problème étant que d'après les textes, un recycleur = une formation, cela est contraignant pour la professionnalisation de l'utilisation de ces appareils (problème de coûts des formations notamment…) mais Mathieu Coulange rappelle qu'il n'est pas possible de déroger à cela car il est indispensable d'associer une formation poussée et précise à l'usage de ces matériels très techniques.

Les travailleurs de l'IFREMER de Brest sont par exemple amenés à plonger dans des conditions moins favorables qu'en Méditerranée avec beaucoup de courant, une moins bonne visibilité et dans le cas de plongeurs qui ne pratiqueraient pas régulièrement, cette technique est dangereuse.

Un autre avantage de l'utilisation des recycleurs que souligne Mathieu Coulange est qu'il peut être un outil sécuritaire et de prévention des accidents de décompression notamment lorsque la chaîne des secours n'est pas simple à mettre en œuvre (plongée dans des zones reculées).

- **APNEE**

Il serait intéressant de développer la pratique de l'apnée dans la zone 0 à 10 mètres pour différents types d'activités :

- La réalisation d'une cartographie,
- La récupération de cages à moules ou autres coquillages,
- La réalisation de prélèvements (algues, coraux, sédiments…)

Une personne peut travailler 1 à 2 heures dans ces conditions avec un nombre d'immersion estimé grossièrement à 10 par heure.

Autoriser ces pratiques permettrait d'éviter de mobiliser inutilement des grosses équipes (personnels et matériels) sur des interventions qui peuvent être réalisées en toute sécurité de manière plus simple et efficace. Cette pratique pourrait concerner environ 10 à 15 plongeurs de l'IFREMER.

- **ROVs**

Ce sont des robots de fond télé-opérés dont l'utilisation se développe considérablement et qui permettent de faire des prélèvements et observations depuis la surface. Le seul problème c'est de gérer la laisse qui les relie à la surface.

Au-delà de 70 mètres, Stéphane Sartoretto préconise d'utiliser les ROVs plutôt que d'envoyer des plongeurs.

En termes d'observations c'est un outil idéal, puisque les techniques vidéo et photographiques ont beaucoup évolué augmentant considérablement la qualité des observations.

En revanche, certaines manipulations et prélèvements ne peuvent être réalisés correctement que par la main de l'homme, c'est la limite des appareils actuels.

Dans le pilotage d'un ROV, à partir du moment où le matériel est de qualité, c'est l'opérateur qui est la clé. Il est pertinent que l'opérateur ait une connaissance poussée du matériel et qu'il puisse notamment gérer les problèmes et réparer les pannes qui pourraient survenir.

Maintenance du matériel

La durée de vie d'un appareil est de 10 ans environ avec une inspection annuelle par un technicien IFREMER et des magasins spécialisés suivant les pièces, et une réépreuve tous les 2 ans.

La traçabilité des plongées est assurée par le remplissage d'une feuille de mer sous format papier qui servent à la justification des interventions de plongée pour avoir les primes à la mer plus que pur assurer une réelle traçabilité des pratiques...Il serait pertinent de mettre en place une traçabilité centralisée des opérations de plongée scientifique au sein de l'Institut (rôle de l'ingénieur sécurité).

Description de l'activité/du type de chantier

Equipe minimale sur le site (pour encadrer les interventions) : 4 personnes

Rôles et fonctions

- en situation normale : 1 COH, 2 plongeurs, 1 secours
- en situation dégradée : 1 COH, 2 plongeurs
- en situation de secours : 1 COH, 2 plongeurs, 1 secours

Formation (personnes et matériel)

La formation des scientifiques a lieu pour partie en centre agréé (au DRASSM) et selon les modalités du décret, elle est également possible par commission d'équivalence (concerne la majorité des plongeurs).

Remise à niveau des connaissances sur l'utilisation des matériels (entretien, maintenance, réparation, etc.)

Dans le cadre IFREMER, la remise à niveau est "aléatoire".

NATURE DES GAZ UTILISES

- **AIR** : est utilisé dans le respect des recommandations du décret.

Son utilisation concerne 30 à 40 personnes.

La table de décompression utilisée est la MT, la table air-oxygène 6 mètres. Si la décompression n'est pas effectuée à l'O2, les plongeurs utilisent un ordinateur.

- **OXYGENE :** utilisé pur en décompression sur des opérations en bouée dérivante ou parachute.

Son utilisation concerne environ 10 personnes pour la France, 2 personnes en moyenne par opération, 4 personnes par chantier et 10 personnes par an.

La table de décompression utilisée est la MT, air-oxy 6 mètres.

- **NITROX** : Pas d'utilisation au sein de l'IFREMER.

- **TRIMIX :** Pas d'utilisation au sein de l'IFREMER

Approvisionnement en gaz :

L'air comprimé est fabriqué par les compresseurs disponibles sur les centres IFREMER.

Le gonflage des gaz est systématiquement sous-traité (GRASSM, etc) et les gaz sont analysés avant plongée.

Stratégie de décompression :

Le décret offre la possibilité à l'employeur de définir l'outil de décompression mis en œuvre par les personnels amenés à intervenir en conditions hyperbares dans son entreprise.

EFFETS SANITAIRES RECENSES LIES A L'EXPOSITION DES TRAVAILLEURS AUX CONDITIONS HYPERBARES / ACCIDENTOLOGIE

A priori, pas d'accidents recensés au sein de l'IFREMER, y compris sur des missions éloignées.

SYNTHESE DES DEMANDES ET REMARQUES DE L'IFREMER

Forte demande sur l'apnée :

La pratique de l'apnée serait très utile pour le personnel IFREMER sur des durées de 1 à 2 heures pour la récupération de dispositifs installés entre 0 et 10 mètres de profondeur ou pour la récolte d'organismes (algues, etc). Cette pratique est actuellement bloquée car la réglementation l'interdit et ce type d'interventions sont assurées en scaphandre autonome, ce qui est assez lourd.

Il faut toutefois faire attention aux dérives possibles et ne pas inciter l'employeur à pousser au développement de l'apnée sur tout type de plongée peu profonde sous prétexte de faire des économies de matériel et de personnel qualifié. Mathieu Coulange précise par ailleurs qu'actuellement, les aptitudes médicales requises pour plonger en apnée sont plus contraignantes

que celles exigées pour la plongée en bouteilles…ce qui ne se justifie pas d'un point de vue physiologique.

Plongée aux mélanges :

L'utilisation de manière ponctuelle de recycleurs dans la tranche 0-40 mètres (50 mètres) et l'utilisation de trimix normoxique en circuit ouvert dans la tranche 50-70 mètres (moyennant formation) pourrait avoir un intérêt pour une partie du personnel IFREMER.

Au-delà de 70 mètres, les ROVs, malgré leurs limites d'utilisation (prélèvement, topographie du lieu…) sont des moyens beaucoup plus adaptés et sécuritaires pour le travail réalisé à l'Institut.

Concernant les préconisations pour l'utilisation du Nitrox, ce serait dès 30 mètres de profondeur (pas avant), pour le comptage des poissons et dans des zones d'intervention aléatoires.

Un point clé = la fréquence de mise en œuvre des techniques de plongées

Cette question est cruciale dans le cadre du développement potentiel de méthodes de plongée très techniques dans un secteur professionnel comme la plongée scientifique où l'activité de plongée n'est pas le cœur de métier.

Pour assurer de meilleures conditions de sécurité, il serait pertinent d'imposer au niveau réglementaire une fréquence minimale de mise en œuvre des techniques et pratiques de plongée.

Jean-Jacques Grenaud explique qu'il pourrait être intéressant de mettre en place un système de traçabilité de la fréquence de plongée d'un individu qui prenne en compte la pratique dans le cadre professionnel ou dans le cadre des loisirs.

INPP - Institut national de la plongée professionnelle

M. Eric ALBIER – Directeur de l'INPP
M. Marc BORNETTA – Médecin, Chef du service médical de l'INPP
Date de l'audition : 28/11/2013
Lieu de l'audition : Marseille

La respiration de mélanges gazeux autres que l'air à l'INPP ne concerne quasiment que la plongée à saturation (formation des élèves plongeurs à ce type de plongée). L'INPP peut apporter son expertise concernant la population intervenant en saturation et respirant du Trimix.

Pas d'utilisation de recycleurs à l'INPP.

DEFINITION DE LA POPULATION PROFESSIONNELLE

Nombre, Classe, Mention des « travailleurs hyperbares »

Les chiffres mentionnés sont issus des bases de données de l'INPP et couvrent la période depuis 1990 jusqu'à décembre 2012. Dans la base de données sont inscrits les gens formés à l'INPP mais également les gens qui obtiennent leur classement par équivalence.

- **Travailleurs de la mention** A
  - 152 travailleurs de la classe 1
  - 2 554 travailleurs de la classe 2
  - 1 355 travailleurs de la classe 3

- **Travailleurs de la mention B**
  - 455 travailleurs de la classe 0
  - 3 713 travailleurs de la classe 1
  - 2 767 travailleurs de la classe 2
  - 171 travailleurs de la classe 3

Parmi les travailleurs de la classe 3B, on recense :

- Les travailleurs ayant fait de la saturation dans la marine qui ont obtenu une équivalence classe 3, mention B.
- Certains travailleurs qui venaient se former à la plongée en circuit ouvert avec respiration de trimix 18%. Cela concerne principalement les plongeurs corailleurs (45 à 50 personnes), mais également des archéologues, des scientifiques.

- **Travailleurs de la mention C**
  - 2 travailleurs de la classe 0
  - 228 travailleurs de la classe 1
  - 1 038 travailleurs de la classe 2
  - 13 travailleurs de la classe 3

- **Travailleurs de la mention D**
  - 1 619 travailleurs de la classe 0

- 590 travailleurs de la classe 1
- 3 travailleurs de la classe 2

L'âge moyen des travailleurs au moment de leur formation est d'environ 27 ans pour les travailleurs de la mention A (90%).

Au moment de l'analyse des dossiers, les âges de demande d'équivalence ne sont pas les mêmes (sont plus élevés) que ceux des demandes de formations.

Les âges extrêmes s'étendent de 18 ans (c'est le minimum requis pour prétendre à une formation) à 60 ans pour le doyen (qui était un ancien démineur venu terminer sa formation).

Pas de données objectives concernant le Nb moyen d'interventions annuelles/ « travailleur hyperbare », le Nb moyen d'interventions totales/ « travailleur hyperbare » ou encore le Nb moyen d'années de travail hyperbare / « travailleur hyperbare » puisque l'INPP n'a pas d'informations sur ce que deviennent les plongeurs une fois formés.

TECHNIQUES D'INTERVENTION EN CONDITIONS HYPERBARES

- **Narguilé + mélange**

L'INPP organise 6 stages de formation par an ce qui représente environ 100 personnes par an. Ce nombre va augmenter puisque le nombre de stages va passer à 9 par an. Cette formation concerne les travailleurs de la mention A, classe 2 avec des paliers à l'oxygène (Tables MT oxy 6 mètres).

- **Système + mélange**

Mention A

Ces formations concernent environ 80 stagiaires par an, les travailleurs de la mention A, classe 3 avec respiration d'Héliox. Sur le quai, les élèves ont une période de formation à l'air puis ils apprennent la plongée à saturation à l'héliox.

L'INPP s'est recentrée sur les formations à destination de la mention A car c'est la mention dans laquelle il y a le plus de besoins et d'attente en termes de formation de personnel.

Mention B

Peu de formation à la classe 2 B sont faites à l'INPP. Il ya par ailleurs beaucoup de centres autres que l'INPP qui dispensent ce type de formations.

La classe 3B n'existe plus pour le moment mais il existe une demande pour la réouverture de cette classe. Les formations pour la mention B, classe 3 intéresseraient notamment les plongeurs professionnels du domaine des médias (photographes, vidéastes) et les biologistes qui s'orienteraient majoritairement vers l'utilisation du recycleur.

La proposition de l'INPP sur la formation de cette future classe 3B serait une association entre ce qui se fait en plongée autonome au narguilé, avec une profondeur de plongée de l'ordre de 90 mètres associée à des procédures de sécurité et une organisation de la plongée plus contraignantes. Il sera notamment proposé, pour le confort et la sécurité des plongeurs, de passer aux mélanges suroxygénés.

- **RECYCLEURS**

Réglementation internationale :

L'intérêt est général sur la question des recycleurs.

Le Canada n'a rien en termes de réglementation sur les recycleurs, les norvégiens non plus, ni l'Australie, mais ils se posent tous la question de l'intérêt de réglementer cette pratique.

Les norvégiens utilisent néanmoins les recycleurs car ils ont l'obligation réglementaire d'assurer, quelle que soit la profondeur de plongée des scaphandriers, 10 minutes d'autonomie et aucun système de plongée en circuit ouvert ne pouvait assurer ces 10 minutes d'autonomie. Ils utilisent un Divex (une sorte de DC 55). Cela leur permet d'avoir jusqu'à 50 minutes d'autonomie en cas de problème avec l'ombilical.

Standards de formation professionnelle à l'étranger :

Pas de réglementation de l'utilisation du recycleur à l'étranger, donc pas de formation.

Centres de formation recycleurs :

Il n'y a pas de formation à l'utilisation de recycleurs à l'INPP.

Si l'INPP devait proposer une formation 3B pour l'utilisation du recycleur, elle préconiserait qu'une formation soit spécifique d'un appareil donné. Avec un recyclage des connaissances en cas d'interruption de pratique pendant une durée prolongée (6 mois par exemple).

Il faudra accréditer une structure et une personne pour dispenser ces formations. La formation doit être très clairement identifiée (quel type d'appareil, pour quelle utilisation…) et rigoureusement restituée.

Il faudrait une codification très précise de la formation à dispenser en fonction du recycleur utilisé avec un support de formation dicté par le constructeur de l'appareil. Les industriels ont bien identifié le danger potentiel lié à l'utilisation de ces appareils et s'attachent à responsabiliser leurs utilisateurs en aval.

Pour la formation aux recycleurs, il est nécessaire d'avoir une organisation et un plateau technique dédiés à cette formation.

Quels sont les critères à prendre en compte pour concevoir ce type de formation :

1) La compétence de l'instructeur est très importante (traçabilité de son cursus).

2) L'apprentissage devra se faire de manière progressive. Les plongeurs doivent d'abord apprendre à plonger à l'air, puis aux mélanges puis descendre en profondeur et apprendre à utiliser les recycleurs.

3) Mettre en place un mode de surveillance et d'intervention de secours en cours de formation. Il faut être capable de surveiller en surface ce qu'il se passe sous l'eau et d'avoir un plongeur de secours capable de récupérer l'instructeur et son élève en cas de problème risquant de survenir dans des zones plus profondes que pour l'apprentissage des systèmes à circuit ouvert.

4) Apprentissage sous forme de compagnonnage : les plongeurs devraient suivre une formation initiale qui serait suivie d'une expérience professionnelle sur le terrain avec un parcours qualifiant sur une période de 2 ans environ et ensuite ils recevraient une formation complémentaire au centre de formation.

Système de secours sur le recycleur et formation en situation de secours :

Sur les 2 types de recycleurs qu'a étudié plus précisément Eric Albier, il n'y a quasiment pas de formation de ce type. Pour passer sur le système de secours, il suffit soit de basculer une manette, ou sinon le basculement se fait de manière automatique. Cela n'est pas du tout satisfaisant car il

est nécessaire de bien comprendre ce que l'on fait lors d'un basculement de son appareil en mode secours.

Maintenance des recycleurs :

La maintenance de ces équipements est capitale en termes de sécurité :

- maintenance d'un pool d'appareils collectifs ;
- maintenance d'appareils individuels.

L'entretien du matériel collectif peut être un problème. La maintenance étant un élément clé de la sécurité, il faudrait affecter aux plongeurs un niveau de responsabilité pour ces tâches.

Question de l'accompagnement des plongeurs débutants :

Il y a en effet un problème au moment de la mise sur le marché du travail des plongeurs au sortir de leur formation. Ils s'inscrivent souvent dans une agence d'intérim en sortie de formation, se retrouvent en attente de mission ou vont au plus offrant et ne reçoivent donc pas d'encadrement professionnel via une entreprise et des tuteurs compétents.

Mais dans le cas des recycleurs, étant donné que c'est un appareil qui nécessite un investissement financier de la part de l'entreprise (matériel, maintenance, personnel qualifié…) cela peut implicitement signifier qu'elle prend la mesure des dangers et ne fait pas les choses à la légère…

Les mentions A, classe 3 sont quand même plutôt encadrées via leur entreprise.

Mise en place d'une formation professionnelle aux recycleurs :

Elle devra être le fruit d'une réflexion entre les différents acteurs concernés.

S'il y a déjà un consensus de rigueur général, une partie de la population professionnelle utilisatrice souhaite plus de flexibilité, de liberté (les plongeurs vidéastes ne veulent par exemple pas plonger en binôme…).

L'INPP est dimensionnée pour mettre en place ce type de formation, mais des grands clubs de plongée auraient également les moyens d'en proposer.

L'essentiel, le fondement de ce type de formation sera le couple formation + formateur.

Norme NF EN 14143 pour le recycleur

La norme NF EN 14143 pour le recycleur devrait être complétée selon Eric Albier. Il faudrait y ajouter des exigences, par exemple :

- Chaque industriel devrait fournir une documentation détaillée à partir de laquelle seront développées les formations.
- Le constructeur pourrait recommander une formation associée au produit.

Il faudrait envisager un agrément du matériel de plongée vendu à des fins professionnelles (interroger l'industriel pour savoir comment entretenir l'appareil, quelles formations il préconise pour l'utilisation de l'appareil…).

Cette norme est conçue suivant le même canevas que pour les appareils de plongée à circuit ouvert, elle contient des informations techniques, mais il manque un manuel d'utilisation spécifique à ce type d'appareils.

Maintenance du matériel

Le contrôle et la maintenance des casques sont faits par du personnel qualifié « Kirby Morgan », les opérations sont enregistrées sur l'historique de l'équipement.

Pour les détendeurs, l'entretien annuel est réalisé par du personnel INPP qualifié ayant suivi un stage chez les industriels de la marque de l'appareil (Aqualung / Beuchat) et un carnet matriculaire d'entretien est tenu pour ces équipements.

Le contrôle des bouteilles de gaz est sous-traité.

Concernant les systèmes de plongée, la maintenance est faite par le personnel INPP mais également par sous-traitance sous contrôle de l'organisme certificateur : Lloyd's Register.

Description de l'activité/du type de chantier

La formation à la plongée systèmes est faite conformément à la réglementation.

Formation (personnes et matériel)

Concernant la plongée systèmes, la durée est de 4 semaines, il s'agit du standard international.

Remise à niveau des connaissances sur l'utilisation des matériels (entretien, maintenance, réparation, etc.)

Un recyclage de la formation des techniciens concernant la maintenance des appareils est réalisé.

NATURE DES GAZ UTILISÉS

- **OXYGENE**

Utilisation d'oxygène pur (100 %) pour faire des paliers chez les travailleurs de la mention A, classe 2.

- **AIR**

Le mode de fabrication de l'air comprimé est soumis au contrôle suivant la réglementation pour les compresseurs.

- **HELIOX** (2 et 10 %)

PPO2 constante à 0,4 bars en phase séjour et 0,6 bars en phase de décompression.

L'héliox est fabriqué par un industriel (Air liquid) qui fournit également une fiche d'analyse.

Une analyse est faite en temps réel lors des transferts de gaz et de manière continue lors des interventions en saturation.

Type de tables de décompression/ Ordinateurs utilisés

Table du ministère, jusqu'à 120 mètres

Pas d'utilisation d'ordinateur.

Avantages sur le plan technique, sur le plan sanitaire, par rapport à l'air

L'héliox permet de supprimer les inconvénients de l'azote (narcose et densité des gaz).

EFFETS SANITAIRES RECENSES LIES A L'EXPOSITION DES TRAVAILLEURS AUX CONDITIONS HYPERBARES / ACCIDENTOLOGIE

Définition de(s) l'effet(s) rapporté(s)

- ***Accident barotraumatique***

Pendant un stage classe 2A et mention B : 1 élève plongeur sur 3 a un petit accident barotraumatique sur la durée du stage (avec en moyenne 1 interruption de stage sur 30 scaphandriers).

Terrain favorable à ce type d'accidents :

- état inflammatoire ORL,
- mauvaise technique de Valsalva liée notamment à l'apprentissage du « bourre-pif » (lors de l'usage d'un masque facial, ce que l'on appelle « bourre-pif » sont des protubérances situées à l'intérieur du masque servant à poser les narines pour les boucher, permettant au plongeur d'effectuer la manœuvre de Valsalva).

Reprise sans séquelle dans 100% des cas (stage différé dans 4% de l'ensemble des stagiaires).

En cas de problème, un médecin est disponible sur place et une évacuation est possible via le Samu.

- ***Accident de décompression***

1,5 accident de décompression par an.

- ***Accident biochimique***

Cela arrive de manière exceptionnelle (pas depuis 2006) et pas de trace à l'INPP.

- ***Autres*** :

En Norvège, des troubles neuropsychiatriques ont été relevés en lien avec la plongée à saturation…mais les déclarations des anciens travailleurs concernés sont remises en question et c'est plus le confinement qui est mis en cause et non les effets à long terme des gaz.

Effets chez les instructeurs de l'INPP :

Rien à signaler. Ce sont des personnels très bien entrainés et très sportifs.

Accidentologie internationale :

Pas d'informations sur le recycleur.

Concernant la saturation, la plongée à saturation en oxygène occasionne une accidentologie faible sur les effets à courts terme (quelques bends), elle occasionne plutôt des effets sur le long terme (de type ostéonécroses diaphysaires…).

PRECONISATION POUR AMELIORER LA SECURITE DES TRAVAILLEURS EN MILIEU HYPERBARE AVEC CE TYPE DE MELANGE / AXES D'AMELIORATION ?

Valider les tables pour les recycleurs.

Le contrôle des organismes de formation :

Si une organisation de formation de recyclage est mise en place, est-ce que des audits pourraient être réalisés ?

Le niveau de risques, de connaissances et de compétences sont moins bons avec l'utilisation des recycleurs. Il serait intéressant qu'une structure extérieure puisse guider l'employeur dans la mise en œuvre de ce type de pratiques dans un cadre professionnel. Dans un cadre légal et professionnel, des audits pourraient être réalisés par l'INPP.

Le contrôle des entreprises de plongée:

Un audit des organismes de plongée est effectué par un inspecteur du travail, mais aucun en France n'est formé spécifiquement à ce métier et ne dispose des compétences requises.

Dans les autres pays, des inspecteurs du travail spécialisés sont en poste :

- 35 inspecteurs en Norvège
- 8 inspecteurs en Angleterre
- 7 inspecteurs aux Pays-Bas

C'est une énorme lacune en France puisqu'il n'y a pas de réel contrôle de l'application de la réglementation. Même si la réglementation est modifiée et bien adaptée, elle n'est pas appliquée sur le terrain. Il n'y a donc dans les faits aucune répression des fraudes et cela pousse notamment les salaires des scaphandriers vers le bas.

Pour Marc Borgnetta, c'est la chaîne dans son ensemble qui ne marche pas. Par exemple, le médecin du travail ne joue pas non plus correctement son rôle en ne remplissant pas les fiches de poste des travailleurs.

Interdiction du SCUBA pour la mention A

La suppression de l'utilisation du SCUBA au profit du narguilé pour les travailleurs de la mention A n'est pas justifiée, elle devrait relever de l'appréciation des risques au cas par cas réalisée par le conseiller à la prévention hyperbares. Les entreprises risquent de passer à côté de certains chantiers en étant limités à la technique du narguilé et parallèlement, cela risque d'entrainer une augmentation du travail illégal des mentions B.

Concernant l'apnée :

Pour la mention A, il n'y a à priori pas d'applications envisageables. En revanche, elle intéresse les secteurs de la pêche (pêcheurs d'oursins sur le littoral) et de l'aquaculture pour vider les caisses de poissons à des profondeurs limitées à 10 mètres. L'INPP n'est pas favorable à ces pratiques dans un cadre professionnel. Marc Borgnetta, souligne que c'est la première fois qu'on réglemente une pratique professionnelle qui prive les personnes d'une fonction physiologique essentielle.

Un autre point est qu'il n'est pas facile d'arriver à des recommandations concrètes sur l'apnée puisqu'elles font référence à des différences physiologistes importantes d'un plongeur à l'autre. Il est donc difficile de fixer une limite de temps et une profondeur pour ces pratiques.

Le cas des corailleurs est difficilement compréhensible :

La réglementation autorise ces travailleurs à aller à des profondeurs de 80 mètres qu'ils dépassent par ailleurs. Ils y vont seuls. Une incohérence demeure pour l'INPP sur ce cas des corailleurs dont les pratiques sont « hors limites » mais autorisées…

Il est nécessaire de bien border les arrêtés d'application du décret

Certains flous demeurent dans les textes encadrant les pratiques professionnelles de la plongée. Par exemple, pour les travailleurs de la mention B, d'après la réglementation, un travailleur peut plonger seul à partir du moment où il y a un surveillant de surface, dont la fonction n'est pas explicitement définie.

IRD - Institut de recherche pour le développement

M. Régis HOCDE – Ingénieur de recherche, Chargé de mission Infrastructures de recherche et observatoires à l'IRD ; représentant de l'IRD au Comité National de la Plongée Scientifique -CNPS- pour l'expertise technique et pour le Ministère du travail)

Date de l'audition : 28/11/2013

Lieu de l'audition : Marseille

L'IRD est un organisme de recherche pluridisciplinaire avec un réseau étendu dans beaucoup de pays (30 pays) y compris dans le domaine de la santé/environnement. L'IRD est présent dans beaucoup de pays et les interventions, y compris au niveau marin, sont organisées dans ces différents pays ce qui implique la prise en compte des compétences/réglementations spécifiques des partenaires à l'étranger.

Un service de l'IRD dédié à la plongée (SEOH) est basé à Nouméa et rayonne sur l'ensemble du Pacifique et l'océan indien. L'IRD détient 2 navires océanographiques propres (ports d'attache : Abidjan et Nouméa) et un caisson de décompression (depuis peu) basé à Nouméa. Les navires de l'IRD sont utilisés de manière mutualisée avec le CNRS, l'IFREMER et l'IPEV au sein de l'UMS Flotte océanographique française (FOF), et leur gestion a été confiée au groupement naval GENEVIR.

DEFINITION DE LA POPULATION PROFESSIONNELLE

Nombre, Classe, Mention des « travailleurs hyperbares »

Il est difficile d'estimer le nombre de travailleurs à l'IRD puisque l'institut ne dispose pas d'une base de données partagées de ses plongeurs et la coordination médicale ne centralise pas le suivi médical de ses agents (environ 2500 personnes plus collaborateurs, présents dans 30 pays).

Parmi les effectifs français, quelques travailleurs appartiennent à la mention B, classe 1 (<10 personnes) et la majorité des plongeurs scientifiques appartiennent à la mention B, classe 2 (> 10 personnes).

Le responsable du service de plongée est un plongeur de la mention A, classe 2. Embauché en tant que mention A, il ne connaissait pas à l'époque le milieu de la recherche.

L'IRD demande à l'INPP depuis 4 ans une formation mention B, classe 3 pour 7 plongeurs de l'équipe de recherche et du service plongée SEOH qui seraient amenés à plonger au-delà de 50 mètres. Pas de suite pour le moment.

<u>En tenant compte des précautions précédentes, les estimations sont les suivantes :</u>

Age moyen des « travailleurs hyperbares » : Autour de 35-40 ans (de 25 à 65 ans).

Nb de « travailleurs hyperbares » : A l'IRD France, une vingtaine de plongeurs ont une activité professionnelle régulière et 4 sont à 100% de leur temps au sein d'un service plongée.

Nb moyen d'interventions annuelles/ « travailleur hyperbare » : Très variable, de quelques dizaines à plusieurs centaines selon les métiers/disciplines.

Nb moyen d'interventions totales/ « travailleur hyperbare » : Impossible à estimer sans données réelles. Entre une ou plusieurs milliers pour plusieurs chercheurs, ingénieurs/techniciens.

TECHNIQUES D'INTERVENTION EN CONDITIONS HYPERBARES

Profil des plongées scientifiques à l'IRD :

En termes de profondeur à l'IRD, la grande majorité des plongées se fait dans la zone 0-40 mètres, les plongées entre 50 et 60 mètres sont en proportion peu fréquentes, bien que les besoins scientifiques existent.

Pratiques :

- **Caisson hospitalier + mélange**

L'IRD dispose d'un caisson à terre à Nouméa que 4 personnes utilisent pour l'entrainement. Ce caisson peut être placé sur un navire en fonction des besoins des missions et il est prévu pour des mélanges Héliox ou Nitrox.

- **Scuba + mélange**

Une vingtaine de personnes l'utilisent.

- **Narguilé**

Jamais de mission n'a mis en œuvre cette pratique.

- **Système + mélange**

Aucun.

- **Apnée**

C'est une pratique marginale. Moins d'une dizaine de personnes pratiquent l'apnée pour réaliser des observations en milieu lagonaire, dans moins de 10 mètres d'eau. Les immersions durent 1 à 2 heures au cours desquelles les plongeurs font de l'observation, du comptage ou du repérage.

Régis Hocdé n'a pas connaissance d'accidents survenus en apnée.

- **RECYCLEUR**

Il n'est pas utilisé dans le cadre professionnel.

Néanmoins, l'institut bénéficie d'autorisations spéciales d'utiliser les recycleurs dans le cadre de projets d'exploration scientifique, ce sera notamment le cas pour la mission en Papouasie, sous couvert de la justification du fait que dans certaines conditions, l'utilisation des recycleurs est avantageuse et plus sécuritaire pour les travailleurs.

Régis Hocdé est formé à l'utilisation de 3 types de recycleurs à titre personnel, les modèles « Inspiration », « Vision » et « Evolution » de AP-Diving qui sont des appareils très fiables (masse importante d'appareils vendus). Ce sont des appareils complètement électroniques en utilisation courante mais un échappement en mode manuel est possible si nécessaire. Les personnes avec qui Régis Hocdé a plongé en arrivant à Montpellier utilisaient ce matériel et il semblait judicieux de bénéficier de leur expérience pour l'apprentissage de leur utilisation. Régis Hocdé prône la vertu du compagnonnage dans l'apprentissage de ce type d'appareils.

Pour Régis Hocdé, la fiabilité, la robustesse et la simplicité d'utilisation de ce type d'appareil est nécessaire à une pratique sécuritaire.

Parmi les avantages présentés par ces types de recycleurs :

- Ce sont des appareils dont le transport est facile (voyage standard)
- La vente s'effectue uniquement auprès de moniteurs/formateurs (7000 à 8000 euros), en effet le constructeur (ici AP-Diving) ne fait pas de vente en direct aux personnes non certifiées.
- 3 cellules O2 disponibles sur ces appareils + possibilité d'installer une cellule CO2

Mise en route de l'appareil avant immersion :

Elle peut être très rapide, mais c'est contraire aux règles de bonnes pratiques. Pour régis Hocdé, mettre en route son appareil trop rapidement est une source d'accidents potentielle. Il est nécessaire de prendre le temps de préparer le matériel et de tout vérifier, prendre au minimum 10 à 15 minutes pour effectuer ces opérations.

Le reconditionnement doit de la même manière, être soigneusement réalisé.

Toutes les opérations liées à la préparation et au contrôle des matériels sont fondamentales. Il arrive fréquemment que les plongeurs fassent 2 plongées par jour d'1 heure à 1 heure et demi dans la zone 0-40 mètres /0-50 mètres, avec un matériel préparé le matin.

Réglementation recycleur :

Les Etats-Unis ont déjà réglementé la pratique des recycleurs dans le cadre professionnel pour tous les domaines y compris la plongée scientifique. Deux publications américaines ont comparé l'accidentologie des plongeurs scientifiques *versus* les autres corporations et l'accidentologie de la plongée recycleur *versus* circuit ouvert. Ces travaux démontrent qu'il y avait moins d'accidents chez les plongeurs scientifiques (Michael R Dardeau, Neal W Pollock, Christian M McDonald and Michael A Lang. 2012 - The incidence of decompression illness in 10 years of scientific Diving. Diving and Hyperbaric Medicine Volume 42 No. 4 December 2012) et que l'usage du recycleur dans la période récente n'implique pas une augmentation du risque (Fock, A. W. (2013, June). Analysis of recreational closed-circuit rebreather deaths 1998-2010. Diving and Hyperbaric Medicine 43(2), 78-85). Pour la sphère scientifique, les auteurs corrèlent ces résultats en premier lieu avec le niveau de formation élevé des agents. Concernant l'usage des recycleurs, ces travaux montrent que les risques peuvent être réduits par une bonne conception des machines et de l'interface homme-machine, intégrant la redondance avec des bail-out embarqués ou accès à des réserves de gaz alternatives et un apprentissage des conduites à tenir pour prévenir ou gérer les situations à problème. Les pratiques américaines d'utilisation de ces appareils décrites dans ces articles sont pour des profondeurs de 0 à environ 100 mètres (0-300 fsw).

La Belgique est en cours de réglementation, ce n'est pas encore passé. La Suisse autorise son utilisation pour certains métiers, mais par défaut de réglementation. L'Angleterre autorise son utilisation pour certaines corporations.

En France, le recycleur est autorisé pour la plongée loisir, y compris pour les professionnels encadrants. Les moniteurs sont autorisés à l'utiliser en formation (0-80 m) et en tant qu'accompagnant (0 à 120 mètres).

Quels organismes utilisent le recycleur en France :

C'est dans le domaine des médias (photographes et vidéastes) que ces pratiques sont le plus développées et sont le plus extrêmes, et où l'on est régulièrement confronté, en circuit ouvert ou fermé, à des comportements à risques. Dans le cadre de la mission en Papouasie, un plongeur vidéaste vient filmer les opérations, mais il a été intégré à l'équipe de l'IRD, plongera en circuit-ouvert et pas au-delà de 50 mètres. Les images de fond seront réalisées directement par les scientifiques.

Organisme institutionnel : Une équipe mixte CNRS/Montpellier plonge au recycleur entre 0 et 30-40 mètres pour travailler sur les poissons.

Des bureaux d'études comme Andromède pratiquent ce type de plongée mais suivant des pratiques extrêmes, avec une prise de risques importante sinon dangereuse, qui ne correspondent pas à l'utilisation « sécuritaire » qui serait envisagée par le reste de la profession scientifique.

Inconvénients des recycleurs/axes d'amélioration :

Concernant le recycleur, son point faible aujourd'hui est les cellules oxygène, très fragiles (depuis la fin de commercialisation des cellules Teledyne en avril 2010 précédemment fiables). Les cellules O_2 sont dorénavant distribuées par le constructeur (ici AP-Diving) mais sans avoir encore atteint un niveau de fiabilité satisfaisant. Dans le cadre de la mission en Papouasie par exemple, l'équipe est obligée de prévoir beaucoup de cellules à l'avance pour s'affranchir des problèmes éventuels de manque (entre 50 et 80 euros la cellule).

C'est également un appareil qui reste très lourd et encombrant. Le « vision » par exemple pèse à l'air libre entre 30 et 33 kg.

Un autre axe d'amélioration serait la mise en place d'un capteur de CO2 fiable.

Types de recycleurs à préconiser dans la pratique de la plongée professionnelle (0-100 mètres)

Les machines AP-Diving sont bien mais d'autres appareils seraient également appropriés, notamment les « REVO ».

Il faut préconiser des appareils relativement simples qui présentent de ce fait moins de sources d'erreurs. Régis Hocdé n'est pas favorable à la multiplication des options sur l'appareil.

Il n'est pas non plus favorable à la personnalisation des équipements par les plongeurs dans le cadre professionnel. Les appareils doivent être utilisés dans le respect strict de la configuration définie, testée et éprouvée par le constructeur. Dans ce contexte, attention à l'utilisation des appareils du type Mégalodon, qui est une machine facilement personnalisable.

- **Pour le recycleur : La norme européenne NF EN 14143 vous parait-elle suffisante ? Applicable ? Adaptée ?**

Pour Régis Hocdé, c'est un point fort qu'une directive et des recommandations européennes soient dédiées aux « Appareils de protection respiratoire - Appareils de plongée autonomes à circuit fermé » et intégrant différents formes de pratique et utilisation de gaz. Cette norme est certainement perfectible mais suffisante à ce stade du développement.

Maintenance du matériel

Pour le recycleur, il est nécessaire de distinguer le type de maintenance suivant les composants :

- L'entretien et la maintenance courante sont faits par l'utilisateur qui doit vérifier l'étanchéité des flexibles, des pièces mobiles et détendeurs ainsi que des composés non électroniques. La fréquence de remplacement des pièces non électroniques dépend de l'entretien et de l'état du matériel.

- La partie électronique est détachable et renvoyée tous les 2 ans au constructeur pour révision (entre 120 et 140 euros). Le constructeur choisi par l'IRD est AP-Diving, il est basé en Angleterre et fait régulièrement des retours d'expérience sur l'accidentologie à ses utilisateurs.

Le coût annuel d'entretien de l'appareil (hors consommables : gaz et chaux) est imputable principalement aux cellules O2 et aux piles qui doivent être changées régulièrement, en fonction de la fréquence de plongée (300-400 euros).

La durée de vie du recycleur est sans limite, sous réserve d'une vérification régulière de l'électronique.

Le contrôle des casques, détendeurs, bouteilles et robinetterie est à moduler selon le type de matériel, les usages, la sensibilité et la capacité de protection.

La vérification des bouteilles de gaz est faite par les centres agréés de ré-épreuves. Un système basé sur le système fédéral semblerait pertinent à savoir, une réépreuve tous les 5 ans avec contrôle visuel ou plus si nécessaire tous les ans.

Prophylaxie

Les plongeurs utilisent du désinfectant pour la boucle, mais pas de manière systématique (sauf en cas de matériel collectif) car les plongeurs disposent pour la plupart de machines personnelles. Les désinfections sont faites par cycles, excepté en zone tropicale où les eaux sont chaudes et où les désinfections sont quotidiennes.

Il faut favoriser la traçabilité, mais de manière non « contraignante » pour rester efficient sur le terrain et avoir des données réelles.

Il faut favoriser l'usage de matériel individuel, dédié à chaque personne pour améliorer la qualité du suivi, de l'entretien, de la maintenance et limiter les risques de transmissions de pathogènes.

Problème de matériel à signaler :

Pas de problème de matériel en tant que tel.

Pour Régis Hocdé, l'équipement ou le suréquipement du plongeur, en conditions inappropriées, peut être une source d'accidents (arrêté procédure novembre 2012).

Les solénoïdes sur les recycleurs sont fiables et des procédures existent au cas où ils se bloquent.

Description de l'activité/du type de chantier

Les chantiers sont de taille variable (de 2 à une vingtaine de plongeurs), sur navires océanographiques, moyens léger ou non…

Equipe minimale : 2 personnes

Cas fréquent : 1 pilote + 3 plongeurs dont 1 assurant la sécurité surface. Suivant l'importance de la mission en nombre de travailleurs impliqués, les fonctions vont être réparties sur plusieurs opérateurs ou au contraire cumulées par un groupe restreint d'opérateurs. Présence systématique d'un chef des opérations hyperbares (COH).

Organisation d'un chantier : pratiques sécuritaires à préconiser en cas d'utilisation de recycleurs

- Plongée en binôme systématique.

- Plonger en conditions homogènes, le même matériel et la même configuration (types de gaz, positionnement des bouteilles bail-out…) pour l'ensemble des plongeurs, c'est une configuration plus sécuritaire (ce sera par exemple le cas sur la mission en Indonésie).

- Redondance du matériel : redondance avec un ou des bail-out, pas de redondance recycleur. Aucune solution n'est vraiment idéale en termes de redondance puisqu'avec un recycleur, le risque de décès est critique en cas d'hypercapnie et avec un circuit ouvert, en cas de problème, le temps de survie sous l'eau est limité… Le profil de plongée et les bail-

out sont déterminés de manière à permettre une remontée complète et sécurisée sur circuit-ouvert.

- Avec les recycleurs, utilisation d'une sangle d'embout qui permet de maintenir le système en bouche en cas de perte de connaissance mais également en cours de plongée « normale » car cela permet de soulager « l'effort » de maintien de l'embout en bouche (le système est moins lourd qu'un détendeur classique, mais l'étanchéité bouche/embout doit être totale durant toute l'immersion pour garantir l'étanchéité de la boucle).

Tables de décompressions à utiliser : le plongeur est contraint de suivre la décompression du modèle intégré à l'ordinateur de la machine (pas le choix du modèle à l'achat de la machine). Il est en revanche possible de modifier le set-point/gradient factor, même en cours de plongée. Des « run-time » (planifications) sont toutefois calculés, inscrits sur des tablettes, pour permettre une décompression en cas de problème avec l'électronique du recycleur (passage possible en mode « circuit-ouvert » de l'ordinateur du recycleur).

- Adaptation de sa stratégie de décompression en cours de plongée en ajustant le gradient factor/set point sous l'eau. Il est ainsi possible d'enrichir le mélange respiré (forcer le set point) ou de ralentir la remontée (faire des paliers profonds). Le dernier palier (entre 4,5 et 6 m) est régulièrement majoré et réalisé sous oxygène pur (par rinçage de la boucle à l'O_2).
- Avant la mise à l'eau, utilisation autant que possible des mêmes mélanges gazeux pour les différents plongeurs.
- Mutualisation des décompressions

  Décompression embarquée par les plongeurs complétée par la décompression du bateau support (ligne de vie ou décompression largable sur pendeur).

Au sein d'une structure, la mise en commun d'un pool de matériel parait incontournable au vu des conditions économiques, mais cela implique de prendre les précautions adaptées.

Le recycleur en plongée loisir :

Tout le monde plonge au trimix en plongée recycleur loisir. Les plongées loisir dites courantes se font entre 0-40 et 50 mètres et durent 60 à 90 minutes. Les plongées plus engagées se font à des profondeurs de 80 à 130 mètres et durent 2h30 à 3h avec une durée fond de 15 à 20 minutes dans des conditions idéales (pas de courant…).

Durée d'immersion limitée à 3 heures pour les plongeurs professionnels :

Régis Hocdé est en accord avec une durée de plongée limitée à 3 heures en milieu professionnel. Cela permet déjà de faire beaucoup de choses, même lors d'une plongée à 100 mètres où la durée fond pourra être de 20 minutes, et où la durée de travail scientifique peut être supérieure (si par exemple la plongée se déroule le long d'un tombant récifal permettant de poursuivre les observations lors de la décompression).

Conditions d'utilisation

Les chantiers se font majoritairement à partir d'un navire océanographique, ou de moyens à la mer légers (pneumatiques, vedettes rapides…).

Un caisson de décompression multiplaces mobilisable sur site est désormais disponible à Nouméa et une équipe est en cours de formation. L'identification du caisson à terre le plus proche et des

moyens d'évacuation possibles est également systématiquement opérée au préalable à un chantier.

Avantages de la mise en œuvre des techniques mentionnées

Différents moyens à la mer et matériels de plongée disponibles :

- Moyens « lourds » (navire, caisson, etc) permettant de disposer d'un environnement adapté et d'explorer des destinations éloignées
- Moyens « légers » et équipements nécessaires pour travailler à proximité d'infrastructures à terre

Plusieurs limites

La mise en œuvre des chantiers est conditionnée par :

- les compétences, l'expérience et la qualification des plongeurs scientifiques de la mission (profondeurs d'interventions, capacité à faire….)
- la disponibilité de personnes qualifiées et expérimentées.
- le nombre de places disponibles à bord des navires océanographiques
- les moyens disponibles
- les infrastructures de secours disponibles

→Mission de recherche en Papouasie :

Ce projet de grande envergure regroupe 95 personnes (60 indonésiens + 35 européens) et comprend un gros volet plongée. Exploration de différents milieux : milieux littoraux, récifaux, karstiques (plongée souterraine) et des lacs endoréiques (lacs d'altitude dans des vallées fermées). Le matériel utilisé pour les plongées sera majoritairement des appareils à circuit ouvert, mais également des appareils à circuit fermé (6 personnes) pour plonger à priori dans la zone de 0 à 100 mètres, si les conditions sont réunies.

La plongée souterraine, consistera en la découverte de cavités et le prélèvement d'organismes, pénétrer de quelques dizaines de mètres à 100 mètres.

Il n'y a pas de caisson sur site mais un caisson opérationnel est disponible au Raja Ampat, dans un hôpital, à moins de 2 heures (en avion ou hélicoptère) du site de plongée. Un médecin est présent sur site. L'hélicoptère est mobilisable rapidement. L'O_2 médical est présent en grande quantité (à bord et sur les embarcations légères : nombreuses B50, S80, BAVU…).

L'approvisionnement en O2 médical et en hélium est effectué auprès d'Air Liquide à Jakarta pour garantir la qualité des gaz respirés.

Concernant les activités de recherche sous-marines réalisées sur place, il n'y aura pas de travaux sous-marins lourds, le plus lourd des activités prévues consiste à fixer des instruments sur le corail à la perforatrice (mais ce sont des matériaux tendres).De manière générale, l'IRD effectue des travaux sous-marins légers : observations, photos, films, topographie, prélèvements et collectes, fixation d'instruments sur du corail et sur des blocs béton, carottage, suceuse de faible puissance pour prélèvements.

Gestion de la progressivité de plongée:

Sur la mission, 1 semaine de réadaptation est prévue pour augmenter en profondeur. Pendant la première semaine d'arrivée sur le chantier, les plongeurs feront d'abord 1 seule plongée par jour dans la zone 0-50 mètres, avec une première plongée prévue entre 0 et 25-30 mètres, puis progressent pour atteindre, dans le cas des recycleurs, 100 mètres si les conditions le permettent.

Organisation de la sécurité :

Concernant les plongées au recycleur, engagement systématique des plongées par binôme suivant un système de roulement. Sur les 6 personnes habilitées à plonger au recycleur, seuls 4 plongeront chaque jour, 2 ne plongeront pas et assureront la sécurité en surface : 1 plongeur mobilisé en sécurité surface + 1 autre plongeur chargé d'encadrer les plongeurs indonésiens ou de se reposer. Il est nécessaire d'avoir en surface une personne capable d'analyser la situation et d'avoir les bons comportements pour gérer les incidents.

De manière générale à l'IRD, concernant la possible mobilisation en place d'un caisson de décompression sur site, c'est à double tranchant : risque de favoriser les comportements dangereux car le fait d'avoir un caisson sur place tendrait à baisser la vigilance des plongeurs et cela entrainerait un effet pervers. Dans le cadre de cette mission, le caisson IRD ne pouvait pas être mobilisé (pas de caisson sur site).

Possibilité d'un partenariat avec des associations sur certaines missions à l'étranger :

Des associations se greffent parfois aux missions de l'IRD (organisation d'expéditions, ou implications dans les activités d'appui aux chercheurs). Sur toutes les missions où l'IRD est partie prenante, la responsabilité incombe alors à l'IRD en cas d'incident. Les plongeurs associatifs en question remplissent un ordre de mission pour l'IRD, sont assimilés agents IRD, et doivent suivre les règles définies par l'IRD.

Les scientifiques IRD travaillent systématiquement en collaboration avec les partenaires des Pays du sud. Les scientifiques plongeurs sont donc amenés à plonger avec des plongeurs étrangers des pays concernés. Ces partenaires ne sont en revanche pas soumis à la réglementation française, mais le schéma de fonctionnement et d'organisation leur est imposé par l'IRD.

Les activités de plongée en général, ou spécifiquement en recycleur et/ou profonde, ne sont pas déléguées à ces associations ou à des sociétés de services extérieures.

Par contre, l'IRD peut faire parfois appel à des compétences extérieures qui viennent renforcer les équipes et sont intégrées aux chantiers (scientifiques plongeurs d'autres organismes, personnes patentées -statut équivalent à celui d'indépendant en Nouvelle-Calédonie, plongeurs ayant une expérience forte et qualifiés pour le certificat d'aptitude à l'hyperbarie -CAH- mention B classe 1 ou 2, mais n'exerçant habituellement pas dans le milieu scientifique...).

A titre d'exemple, pour l'expédition Lengguru 2014, tous les plongeurs en circuit ouvert appartiennent à des instituts de recherche européens ou indonésiens (à l'exception du caméraman). Pour les plongeurs au recycleur à circuit fermé, un retraité IRD (ancien responsable du service plongée de l'IRD), et des plongeurs expérimentés qualifiés CAH 2B peuvent intervenir via des ordres de mission IRD et des conventions de partenariat bénévole.

Formation (personnes et matériel) :

Les plongeurs qui constituent les équipes sont issus de 2 filières essentielles :

- Les plongeurs professionnels qui ont reçu une formation type INPP ou autres organismes de formation agréés (classe 1B ou 2B).

- Beaucoup de plongeurs issus de formations « loisirs » et qui passent des équivalences en faisant valoir leur expérience de la plongée.

Le « vrai » travail scientifique sous l'eau s'apprend en revanche par compagnonnage. Régis Hocdé pense que les formations faites au CNRS où des plongeurs scientifiques « seniors » forment les nouveaux plongeurs sont très bien adaptées à l'apprentissage de ces métiers. L'apprentissage y est ainsi progressif. Il préconise de ne pas externaliser complètement le processus de formation au risque de perdre cette notion de compagnonnage.

Quels pré-requis préconiser pour la formation à la plongée recycleurs en milieu professionnel ?

En France, pour la plongée loisir, la législation est contraignante, le pré-requis nécessaire pour prétendre à une formation recycleur est d'être plongeur niveau 3, nitrox confirmé. Par ailleurs, toujours en plongée loisir, un nombre d'heures de pratique est imposé avant de passer les étapes de l'apprentissage.

La transposition de ces formations en plongée professionnelle nécessite de fixer des limites, mais il pourrait être intéressant de donner une grande part d'appréciation à l'instructeur de plongée et de valoriser l'expérience de la pratique de la plongée aux mélanges et/ou aux recycleurs. Pour Régis Hocdé par exemple, la diversité des situations de plongée auquel un plongeur a été confronté est plus importante que le nombre de plongées qu'il détient à sont actif.

La difficulté est de savoir comment qualifier « durablement » les personnels en recycleur dans le cadre de la plongée scientifique ou dans les secteurs professionnels où la plongée n'est pas le cœur de métier. Il faudra par exemple faire des recommandations fortes concernant les temps de repos pour éviter les phases de plongée intenses versus des phases sans aucune activité de plongée…Il faut réussir à trouver des formulations contraignantes mais pas pénalisantes pour l'avenir de la plongée scientifique.

Remise à niveau des connaissances sur l'utilisation des matériels (entretien, maintenance, réparation, etc.)

Non pertinent si les personnes concernées sont impliquées dans l'enseignement de la plongée.

Mais pas de « remise à niveau » organisée à ce jour au niveau de l'activité professionnelle.

NATURE DES GAZ UTILISES

En circuit-ouvert : pas d'utilisation de mélanges

- décompression optimisée au nitrox pour les plongées à 40-50 mètres.
- pas de configuration trimix normoxique sur la tranche 50-70 mètres.

- **OXYGENE**

Pas de décompression à l'O2 chez les plongeurs de l'IRD

Mode de fabrication et modalités d'analyse des gaz :

Bouteille d'O2 médical (B50) + Remplissage des bouteilles par transvasement et/ou utilisation de surpresseur.

Contrôle : Pour tous les gaz, mesure du mélange obtenu avec analyseur O2/He pendant le remplissage, après le remplissage et 24h après ou avant utilisation.

Traçabilité : identification des bouteilles de gaz avec sur chaque bouteille une pastille de couleur et des informations sur le contenu (date de préparation, qualité du mélange, plongeur maximale d'utilisation…)

Pendant l'exposition : analyse possible hors cadre professionnel avec le recycleur.

Type de tables de décompression/ Ordinateurs utilisés :

En milieu professionnel : utilisation d'ordinateurs de décompression multigaz.

Hors cadre professionnel : utilisation du système de décompression intégré du recycleur.

Avantages sur le plan technique, sur le plan sanitaire, par rapport à l'air :

L'O2 pur est utilisé seulement hors cadre professionnel avec l'utilisation du recycleur. Son utilisation avec un recycleur permet une amélioration, une optimisation de la décompression.

Limites:

En circuit ouvert, les profondeurs et durées d'utilisation sont limitées. Compte tenu des risques liés à la manipulation, des recommandations et précautions d'utilisation sont nécessaires.

Pour les plongeurs de l'IRD, l'usage du Nx70 ou Nx75 est préféré à l'O2 pur en décompression.

- **AIR**

Mode de fabrication et modalités d'analyse des gaz :

Air comprimé.

Type de tables de décompression/ Ordinateurs utilisés :

En milieu professionnel : utilisation d'ordinateurs de décompression simples ou multigaz.

Hors cadre professionnel : utilisation du système de décompression intégré du recycleur.

- **NITROX**

Les Nitrox utilisés sont essentiellement des Nitrox 32, 40 et 70. D'autres sont utilisés, mais hors cadre professionnel.

En milieu professionnel, l'usage du Nitrox est fait en décompression essentiellement, voire en utilisation continue mais dans le cadre de plongées de faible profondeur (0 -30 mètres).

Hors cadre professionnel, il est utilisé avec un recycleur.

Mode de fabrication et modalités d'analyse des gaz :

Utilisation de bouteilles d'O2 médical (B50)

- Remplissage des bouteilles par transvasement et/ou utilisation de surpresseur
- Utilisation d'un compresseur à membrane
- Remplissage chez des prestataires (selon sites et contextes)

Type de tables de décompression/ Ordinateurs utilisés :

En milieu professionnel : utilisation d'ordinateurs de décompression simples ou multigaz.

Hors cadre professionnel : utilisation du système de décompression intégré du recycleur

Avantages sur le plan technique, sur le plan sanitaire :

Le Nitrox est préféré à l'O2 en décompression car il peut être utilisé plus rapidement, avant 6 mètres de profondeur. Les conditions dans lesquelles les plongeurs de l'IRD interviennent ne sont pas nécessairement des zones avec du courant, mais en revanche, ces sont des milieux où une

très forte houle peut être présente et pour lesquels une déco à 3 mètres est très inconfortable, d'où l'intérêt de pouvoir faire de la déco plus profonde avec le Nitrox.

Son utilisation en recycleur permet une amélioration, une optimisation de la décompression.

Limites :

En circuit ouvert, les profondeurs et durées d'utilisation sont limitées. Une typologie d'accidents est propre aux plongeurs Nitrox en circuit ouvert et des recommandations et précautions d'utilisation sont nécessaires.

Pour une utilisation avec le recycleur, éviter les activités à risques : progression à contre courant, manutention, manipulation d'instruments lourds, etc… toutes activités ou conditions environnementales nécessitant un effort physique important.

- **TRIMIX**

Il est utilisé en plongée, hors cadre professionnel.

Mode de fabrication et modalités d'analyse des gaz :

Hors cadre professionnel : utilisation de bouteille d'Hélium (B50) + soit

- Remplissage des bouteilles par transvasement puis en complétant
- Remplissage des bouteilles avec stick mélangeur et compresseur.

Type de tables de décompression/ Ordinateurs utilisés :

En milieu professionnel : utilisation d'ordinateurs de décompression multigaz.

Hors cadre professionnel : utilisation du système de décompression intégré du recycleur

Avantages sur le plan technique, sur le plan sanitaire, par rapport à l'air :

L'usage du trimix ouvre des perspectives en termes de durée d'immersion et présente également des avantages sécuritaires offrant notamment un meilleur confort de plongée (température du gaz respiré, etc).

L'usage du trimix en configuration matérielle « classique » de type air jusqu'à 50 voire 70 mètres est pertinente et sécuritaire (clarté d'esprit : diminution des risques liés à l'ivresse des profondeurs et la diminution des facultés cérébrales).

L'usage du trimix en configuration adaptée permet d'explorer et de travailler dans une zone plus profonde que 70 mètres, tout en restant inférieur à 90-100 mètres.

Limites:

Les limites sont liées aux volumes importants de gaz transportés sous l'eau, rendant non opérationnelles des plongées « trop engagées », ou à la création de situations de suréquipement qui constituent des facteurs de risques d'accidents.

Pour une utilisation avec le recycleur, de la même manière qu'avec le Nitrox, éviter les activités à risques : toutes activités ou conditions environnementales nécessitant un effort physique important.

Limitation des profondeurs de plongée

Pour Régis Hocdé, une plongée à 90 ou 100 mètres, cela ne fait pas une grande différence. En revanche, au-delà de 100 mètres, on entre dans une autre « dimension » de plongée.

Concernant l'instauration d'une limite maximum de profondeur en plongée professionnelle, Régis Hocdé préconise de ne pas fermer les portes à l'évolution des connaissances et de la technique et

donc de ne pas limiter la profondeur de plongée, tout en mettant les restrictions nécessaires pour assurer aujourd'hui la sécurité des interventions.

EFFETS SANITAIRES RECENSES LIES A L'EXPOSITION DES TRAVAILLEURS AUX CONDITIONS HYPERBARES / ACCIDENTOLOGIE

En circuit ouvert, un accident grave à l'air a eu lieu à l'IRD il y a 20 ans, lié à un essoufflement.

Incidents :

- La manipulation d'une « suceuse » (aspirateur à sédiments pour le fond marin) à 50 mètres par des personnes inexpérimentées a causé un incident, sans conséquences graves.

Exemple de dysfonctionnement :

- Le cas d'un chantier de plongée dans de l'eau fraîche basique (pH = 11,5/11,8) avec une forte turbidité et une instrumentation à faire avec récupération de fluides. Les conditions de plongée difficiles et le travail fin à réaliser sous l'eau justifiaient l'utilisation de recycleurs pour une profondeur qui était limitée à 50 mètres dans le cadre de cette opération. Ce choix d'organisation a été validé par la direction, mais une fois sur place, les plongeurs ont finalement plongé en circuit ouvert, seuls et sans contact surface. Il s'agit d'un exemple d'une situation à fort risque qui avait pourtant été anticipée.

Depuis 2005 à l'IRD, aucun comportement à risque flagrant relevé et pas de plongées à l'air au-delà de 60 mètres (avant il y a eu des cas où des personnes ont plongé très profondément à l'air).

A l'IRD, aucun problème ayant nécessité la mise en caisson de personnel n'a été recensé.

Ces situations n'ont pas été portées à la connaissance de l'employeur, malgré les procédures existantes, et ne sont donc pas documentées. Elles ont été rapportées oralement et indirectement, et nécessiteraient, de fait, d'être vérifiées pour être précisées.

Par ailleurs, dans la survenue des accidents, ce sont presque systématiquement des problèmes comportementaux qui sont mis en cause, plus que des problèmes techniques. Il est difficile d'endiguer certains comportements individuels dangereux qui restent cependant des cas isolés.

JJ Grenaud explique qu'un dispositif d'évaluation comportementale du plongeur est en cours de mise en œuvre chez les sapeurs-pompiers (via des grilles d'évaluation). Le plongeur sera mis en situation opérationnelle et ses réactions face à des situations anormales, inattendues sont observées.

Sécurité des travailleurs

Jean-Claude Le Péchon – Ingénieur conseil indépendant - Expertise sécurité travaux hyperbares au sec ou en immersion

Dates des auditions : 29/11/2013 et 19/12/2014

Lieu des auditions : Paris

M. Le Péchon est Hyperbariste classe 3 toutes catégories (moniteur national de plongée) – 4 années de recherche sur les gaz respirables à grandes profondeurs – chargé de la sécurité dans une entreprise de travaux sous-marins, développement des méthodes de plongée (démo 300 mètres) – parmi les scaphandriers suivis, aucun accident mortel - utilisation du nitrox et principalement de l'hélium en mélange ternaire ou binaire - Activités de conseil pour les travaux en air comprimé, y compris des travaux en tunnel (75 chantiers de travaux en air comprimé, travaux en mélange ternaire, travaux profonds à 6,9 bar) – Organisme agréé de formation pour les hyperbaristes de la mention D classe 1 et 2 jusqu'en 2005. Dispense des formations hyperbares notamment en termes de sécurité pour les personnels non classés – conseiller du ministère du travail pour la rédaction de la réglementation hyperbare, a notamment participé à la rédaction du décret hyperbare de 1990 et des arrêtés pris pour son application.

DEFINITION DE LA POPULATION PROFESSIONNELLE

- **Mention A**

Il s'agit des scaphandriers des entreprises de travaux sous-marins. L'annuaire 2013 des entreprises de travaux sous-marins (Vac éditions) contient des données sur la sécurité des chantiers et des commentaires de MM. Le Péchon et Gourdon notamment à propos des premiers arrêtés d'application du décret de 2011.

- **Mention B**

Cette mention regroupe beaucoup de catégories différentes de professionnels :

- les moniteurs de plongée
- les plongeurs scientifiques (biologistes, spécialistes de l'environnement…)
- les archéologues…
- les plongeurs de l'audiovisuel et des médias (photographes, vidéastes…)
- les pêcheurs
    - Pêcheurs d'ormeaux : pour la collecte, ils disposent de permis de collecter. Ils plongent seuls ou à 2, la plupart du temps en bouteille et quelques fois en apnée. Pas d'accidents recensés à la connaissance de Jean-Claude Le Péchon. Les ormeaux ne sont par ailleurs pas situés très profondément dans l'eau.
    - Corailleurs
    - …
- les aquaculteurs
- la protection civile.….

Etonnamment les douaniers (ministère des finances) ne sont pas concernés.

Ce qui constitue 8 mentions B différentes.

- **Mention C**

Concerne les personnels médicaux. Il y a 36 centres de médecine hyperbare en France avec en moyenne 10 hyperbaristes par centre. Ces personnels représentent donc environ 400 personnes. Ils interviennent 5 à 10 fois par semaine (assez variable) sous une pression maximale de 4 bars (sauf cas très particuliers) mais en général de 1,5 bar.

Ils ne respirent que de l'air comprimé et de l'oxygène pour certaines de leurs décompressions.

Le décret de 2011 fait apparaître 4 mentions C différentes.

- **Mention D**

Les métiers

Les personnes titulaires de cette mention sont principalement des tubistes qui travaillent dans les tunneliers. Leurs activités sont très variables et dépendent des conditions du chantier de construction de tunnel. Ce sont des ouvriers « normaux » du chantier qui ont en plus une certification pour travailler en conditions hyperbares et peuvent donc être affectés en cas de nécessité pour travailler sous pression.

L'activité de construction de tunnels dans le monde est en plein essor, contrairement à la France où ce type de chantiers se fait plus rare. Les activités de construction de tunnel en Chine et en Russie sont en pleine expansion. Hong-Kong compte 6 tunneliers en activité et la Chine 30 tunneliers pour la seule ville Shanghai. Elle concerne des projets de constructions d'égouts ou de tunnels de métro, d'autoroutes et de galeries techniques.

Des tunneliers vont être mobilisés pour la construction du grand Paris et les pressions d'intervention risquent d'y être élevées.

La demande de tubistes au cours de ce type de travaux reste aléatoire en France et l'activité se limite souvent à des interventions ponctuelles de vérification et réparation du matériel de coupe ou d'abattage notamment. Cela a été le cas pour la construction du métro de Toulouse où une seule intervention hyperbare a été nécessaire pendant toute la durée des travaux de creusement des lignes seule la jonction au centre ville a nécessité un nombre significatif d'interventions hyperbares de courtes durées. Lors des travaux de construction du périphérique nord à Lyon en revanche, au total ont été nécessaires 10 000 interventions homme en 3 ans à 2,7 bars ce qui illustre bien la forte variabilité qu'il peut y avoir d'un chantier à un autre.

De manière plus anecdotique :

Les travailleurs de la mention D font des visites de cabines d'avion chez Airbus Industries à 0,6 bar pour la recherche de fuites et le contrôle systématique de l'étanchéité de la cabine avant toute livraison d'un appareil. Des appareils étant livrés tous les jours, certains personnels sont exposés quotidiennement.

Ces hyperbaristes sont également amenés à intervenir en centrale nucléaire. Une épreuve du bâtiment réacteur est faite tous les 10 ans, lors des arrêts de tranche. Une équipe est mobilisée pendant 3 à 4 jours et visite l'enceinte pressurisée en deux étapes. La première étape s'effectue à 1 bar. Elle est réalisée par du personnel EDF formé extemporanément à l'hyperbarie mention D classe 0 et permet de vérifier qu'il n'y a pas de fuite du bâtiment réacteur. La seconde étape, en cas de fuite, a lieu à 4,2 bars et il peut être nécessaire d'entrer dans le bâtiment réacteur requérant en général l'intervention d'une équipe de scaphandrier mention A. Vu le nombre de centrales EDF, on estime à 1 ou 2 le nombre d'arrêts de tranche par an… les tests hyperbares durent en général moins d'une semaine.

Les pratiques

En France, les travaux de tunneliers sont réalisés uniquement à l'air comprimé avec décompressions à l'oxygène dans la majorité des cas, lorsque la pression dépasse 1,8 bar.

A l'étranger, quand la pression dépasse parfois 4 bars, les travailleurs interviennent en respirant des mélanges gazeux autres que l'air. En France, ces situations de dépassement de 4 bars ne se présentent pas car il n'y a pas de travaux effectués à cette pression. Le cas pourrait éventuellement se présenter dans le cadre de travaux de construction du grand Paris (la pression sera peut-être même supérieure à 5 bars ?).

Aux Pays-Bas, Jean-Claude Le Péchon a travaillé sur une série d'interventions atteignant des pressions maximales de 6,9 bars en saturation impliquant l'utilisation d'une «navette pressurisée, montée sur le train de service de la galerie » et de 4 mélanges ternaires différents. Les travaux étaient organisés avec une rotation de 2 équipes qui restaient en pression 1 semaine en moyenne, suivie de 4 jours de décompression finale. Chacune faisant une intervention dans le tunnelier chaque jour.

Il y a eu à ce jour 2 constructions qui ont préparé des interventions jusqu'à 13 bars : Tunnel Hallandsas en Suède, et galerie de prise d'eau sous le Lake Mead (Nevada) en cours mais qui n'a pas encore eu recours à l'hyperbarie.

→ REMARQUES DE JEAN-CLAUDE LE PECHON SUR LE DECRET HYPERBARE DE 2011 :

❖ Les limites réglementaires de pression pour la respiration d'air comprimé imposées par le décret de 2011 sont :
    - 50 mètres ou 5 bars limite imposée aux scaphandriers de la mention A via l'arrêté spécifique aux travailleurs de cette mention.
    - 60 mètres ou 6 bars pour les autres mentions et professionnels de la plongée loisir

Concernant les gaz respiratoires à utiliser, la réglementation précise pour les travailleurs de la mention A, qu'au-delà de 50 mètres, le gaz ne doit plus être de l'air. C'est un problème de physiologie, l'air est dangereux à partir de 50 mètres, il faut donc mettre tous les intervenants à 50 mètres maximum. Au-delà de 50 mètres, il faut absolument respirer des mélanges au lieu de l'air. Ce n'est pas non plus logique de limiter les travailleurs les mieux formés à 50 mètres ou 5 bars et les autres à 60 mètre ou 6 bars…

Cette mesure est donc justifiée puisque l'air devient dangereux à partir de cette profondeur d'environ 50 m, mais il faudrait logiquement élargir cette interdiction à toutes les mentions. (Principe de prévention : « Remplacer ce qui est dangereux par ce qui l'est moins »).

❖ D'après le décret de 1990, lorsque l'on envisage une pratique qui « sort des clous », elle est soumise à demande d'autorisation auprès du Ministère du travail (arrêté 15 mai 1990). Le problème étant qu'actuellement les demandes faites restent sans réponse, d'autant que l'absence de réponse, passés 2 mois vaut refus…sans que les autorités ne soient tenues de fournir une quelconque justification.

❖ Le décret restreint les travailleurs de la mention A à l'utilisation du narguilé. Le SCUBA (scaphandre autonome) doit néanmoins pouvoir être autorisé dans certains cas spécifiques où c'est la meilleure méthode de plongée applicable. La réglementation laisse une ouverture pour ces cas particuliers en précisant que l'autorisation de l'utilisation du SCUBA peut être accordée par l'inspecteur du travail à titre exceptionnel dans certaines conditions mais s'agit-il de celui du site ou de celui de l'entreprise ? Et quelle est sa compétence en la matière pour prendre une telle décision ?

- D'après la réglementation, la pratique de l'apnée est interdite uniquement aux travailleurs de la mention A. Pour quelle raison sont-ils les seuls à subir cette interdiction ? Ce n'est pas une pratique courante, mais pourquoi l'interdire strictement.

- Il n'est pas correct de parler de profondeur ni de plongées lorsque l'on englobe les travailleurs qui n'interviennent que dans le cadre de travaux à sec, il faut donc parler de pression pour les Mentions C et D.

- Concernant les gaz, ce qui compte en termes d'exposition c'est leur pression partielle (ni la pression, ni la profondeur). Seul l'air est limité avec une profondeur donnée, mais pour les autres gaz (hélium, azote, H_2S, CO, CO_2, kérosène…) dans les atmosphères, il n'y a que les pressions partielles qui comptent. Un problème important concerne la contamination des atmosphères par les gaz trace (H_2S, kérosène, CO, CO_2, vapeurs d'huile, *etc.*). Pour calculer les valeurs limites d'exposition professionnelles pour ces substances toxiques en conditions hyperbares, il faut prendre les valeurs limites définies à la pression atmosphérique et les transposer en pressions partielles (cette indication était présente dans le texte de 90 mais plus dans celui de 2011).

- Il n'y a aucune raison d'utiliser l'air médical (très sec) pour gonfler la chambre hyperbare, en particulier à l'hôpital, il suffit d'air respirable.

- Dans le texte, il faut revoir la terminologie pour désigner les différents types de personnes qui interviennent en conditions hyperbares. Le terme « opérateur » n'est pas du tout approprié et porte à confusion.

- Historiquement, les moniteurs de plongée n'ont pas souhaité se soumettre au code du travail, hormis le syndicat des moniteurs de plongée. Mais implicitement, en réalité, ils étaient concernés car tout salarié qui travaille en plongée à plus d'1 mètre de profondeurs devait être soumis aux dispositions du décret de 1990. Pour intégrer les moniteurs dans le décret de 2011, il aurait été judicieux de créer une mention E « personnels professionnels de la plongée loisir » qui aurait inclus les plongeurs professionnels encadrants la plongée loisir. Pour les personnels de cette mention, seraient prévues des dispositions spécifiques à ces pratiques professionnelles et des passerelles vers certaines activités de la mention B qui nécessitent une expérience poussée de la pratique de la plongée (archéologie, photographie ou vidéo sous-marine…). Une spécificité concerne notamment les situations de secours dans lesquelles contrairement aux autres pratiques en binôme, le moniteur de plongée est seul avec ses élèves et doit assurer pour lui-même sa sécurité et son secours éventuel.

- Dans le décret de 1990, le chef des opérations hyperbares (COH) doit posséder un niveau élevé de formation et de qualification et il avait la responsabilité de **diriger** les opérations (responsabilité pénale). Depuis le décret de 2011, il agit désormais sous la responsabilité de l'employeur mais cela va à l'encontre de la sécurité car en cas de problème, ce sera l'employeur qui sera incriminé…. Cette déresponsabilisation du COH risque d'entrainer des dérives.

<u>INTERVENTIONS DES TRAVAILLEURS EN CONDITIONS HYPERBARES</u>

Pratiques professionnelles d'intervention :

- **SYSTEME + MELANGE**

Il est très compliqué de mettre en place un arrêté d'application pour les équipements nécessaires à ce type de plongées.

Il existe 2 organismes qui ont édités des recommandations détaillées et précises concernant les pratiques à mettre en œuvre pour les travaux subaquatiques de l'offshore fondées sur le management de la sécurité (OSHA 19000).

- IMCA (International Marine Contractor Association)
- OGP (Oil and Gaz Producers)

Une compagnie pétrolière membre de l'IMCA ne peut mettre en œuvre un sous-traitant qui ne serait pas affilié à l'IMCA.

Ces recommandations devraient servir à la rédaction des arrêtés d'applications avec comme mot d'ordre « la sécurité ». Il faut placer la sécurité en priorité n°1, avant les considérations financières ou de lobby, c'est primordial.

Les travaux sous-marins mis en œuvre à partir de 90 mètres de profondeur doivent être réalisés en utilisant une tourelle de plongée pour les activités professionnelles de l'industrie (Mention A).

- **SCUBA + MELANGE**

Pour l'utilisation du SCUBA, la respiration de Nitrox doit être si possible privilégiée à l'air car elle apporte un gain en termes de sécurité (décompression réduite, meilleur confort de plongée, moins de fatigue…).

Pour des plongées au-delà de 50-60 mètres, il faut obligatoirement utiliser des mélanges. Le texte est clair sur le sujet, au-delà de 50 mètres (pour les titulaires de la Mention A) ou 60 mètres ou 6 bars pour les autres mentions il faut plonger au mélange, quel que soit le moyen d'intervention car c'est un gain important en matière de sécurité (la plongée à l'air au-delà de 50 mètres constitue un risque sanitaire majeur).

Dans le nouveau texte, le SCUBA est interdit pour la mention A, mais lorsqu'il est autorisé, il l'est jusqu'à 90 mètres de profondeur, aux mélanges… alors qu'avant c'était limité à 60 mètres.

2 types de SCUBA existent : les circuits-ouverts et les recycleurs (circuits-fermés ou semi-fermés). Pour des interventions au-delà de 90 mètres, le circuit ouvert n'est pas adapté et la pratique du recycleur des conditions d'intervention et de secours rendent cette pratique très risquée. Il vaut mieux privilégier les systèmes de type tourelle pour faire du travail comme celui mis en œuvre dans la mention A.

Pour la mention A, il faut limiter le scaphandre autonome à 60 mètres de profondeur.

- **NARGUILE + MELANGE**

- <u>Entre 0 et 18 mètres</u>, l'air convient.
- <u>Entre 18 et 30 mètres</u>, il faut privilégier le Nitrox, voire l'air
- <u>Entre 30 et 50 mètres</u>, il faut privilégier l'air avec une décompression à l'oxygène (le Nitrox n'est plus avantageux)
- <u>Au-delà de 50 mètres</u>, l'utilisation du narguilé est inappropriée pour des raisons pratiques. Il faut privilégier les bulles de plongée.
- <u>Au-delà de 90 mètres le transfert sous pression est nécessaire</u>

- **RECYCLEURS**

L'utilisation des recycleurs n'est pas interdite par le décret : rien n'empêche ni ne réglemente leur utilisation.

La mise en œuvre de ce type d'appareil nécessite d'abord une formation particulière et, quelle que soit la mention, de mettre en place un manuel de sécurité d'utilisation des recycleurs clair précisant notamment le besoin d'une homogénéité du matériel utilisé par les plongeurs au sein d'une même entreprise mais en restant du matériel personnalisé pour limiter notamment les problèmes liés à l'hygiène, au nettoyage et au remplissage de la chaux sodée. Il faut spécifier les moyens de secours liés aux pannes de recycleurs, aux défaillances de l'ordinateur de plongée qui y est en général associé. Cette mesure est nécessaire pour les risques de panne et d'erreur humaine.

Les risques sanitaires principaux liés à l'utilisation des recycleurs sont l'hypoxie, l'hyperoxie et l'hypercapnie (liée à un problème avec la chaux sodée qui capte le CO_2) qui entrainent une perte de connaissance et une perte des facultés cognitives très rapides (en moins de 10 minutes).

Il n'y a aucune limitation de profondeur liée à l'utilisation du recycleur. L'autonomie est dépendante de la cartouche de chaux sodée (les spéléologues ont plongé jusqu'à 12h en autonomie) et de la procédure de décompression à utiliser pour le retour en surface.

La norme définit un certain nombre de critères pour la fabrication des recycleurs, mais certains plongeurs conçoivent eux-mêmes leur matériel et plongent avec, donc ne respectent pas nécessairement les exigences de la norme.

Dans le cas des recycleurs semi-fermés (exemple : recycleur CRABE utilisé par la marine), au lieu d'ajouter de l'oxygène pur, on ajoute un mélange très hyperoxique (le choix du mélange dépend des injecteurs et de la profondeur/pression). Le recycleur semi-fermé CRABE utilisé par la marine présente l'avantage que la consommation d'oxygène est compensée par le mélange en fonction de l'exercice produit par le plongeur.

Pourquoi est-ce que cet appareil a révélé des œdèmes pulmonaires ? Comparativement au DC55 utilisé auparavant par la marine, l'épaisseur du CRABE sur le dos des plongeurs est augmentée. C'est un appareil qui, de ce fait, augmente l'effort inspiratoire (à presque 20cm de hauteur d'eau) lié à la différence de pression entre le haut et le bas avec une tendance à créer de l'œdème pulmonaire. On pourrait ajouter des poids en haut et en bas dans la conception de l'appareil pour rééquilibrer les pressions.

- **APNÉE**

Des informations intéressantes sur cette pratique sont disponibles dans le mémoire de diplôme inter universitaire de médecine subaquatique et hyperbare du Dr Florent Bonnet datant de 2013 et intitulé « La plongée en apnée, de l'information à la prévention des risques » (concerne l'apnée de loisir et de compétition en piscine).

Pour Jean-Claude Le Péchon, un plongeur professionnel devrait avoir interdiction de faire des compétitions en apnée, c'est une pratique trop risquée et sans intérêt professionnel.

- **Plongées successives multiples dites plongées « Yo-Yo »**

Concernant la pratique de la plongée Yo-Yo dans un cadre professionnel, une étude sur les plongées Yo-Yo en en Australie/Nouvelle-Zélande chez les aquaculteurs qui descendent à 18 mètres, X fois dans la journée (18 plongées dans la journée) a montré que cette pratique ne donnait lieu à aucun accident de décompression et qu'il n'y avait pas de bulles mesurées chez les plongeurs lors des campagnes d'analyse. Ces observations ont été contrôlées par le ministère du travail et la médecine du travail australiens [cf Article de David Smart]. Au regard de ces observations, la plongée Yo-Yo en scaphandre autonome, condamnée à priori par la communauté scientifique, semble finalement causer moins voire pas d'effets physiologiques négatifs

comparativement à la plongée « classique » en bouteille et est donc autorisée dans certaines conditions.

Les normes sur le matériel d'intervention en conditions hyperbares :

Les normes ne concernent que les vendeurs de matériel, elles ne sont pas obligatoires pour l'utilisateur. Pour que l'employeur soit tenu de respecter une norme, il faut que cela soit exigé par arrêté. Il faut faire référence aux normes dans les arrêtés pour les rendre opposables à l'utilisateur.

→La norme Européenne EN 12110 vous semble-t-elle bien adaptée pour les tunneliers ?

Cette norme est bien adaptée pour les pratiques françaises actuelles, mais si les entreprises passent à l'utilisation de mélanges, la norme européenne devra être adaptée au contexte hautes pressions puisque les pratiques prises en compte actuellement par cette norme sont uniquement la respiration d'air comprimé et la décompression à l'oxygène.

Il est également nécessaire de préciser dans cette norme les conditions en matière d'ergonomie des sas. L'ergonomie du poste de travail du chef de sas du tunnelier n'y est pas optimale.

Description de l'activité/du type de chantier

→Equipe minimale sur le site (pour encadrer les interventions)

Concernant les tunneliers, c'est au cas par cas (selon le temps, pression, nombre d'intervenants…)

- Toujours 2 travailleurs sous pression : il faut travailler systématiquement en binôme à l'intérieur et disposer d'un sas à pression atmosphérique pour entrer
- 1 secours à l'extérieur
- 1 chef de sas
- 1 chef des opérations hyperbares (COH)

Il faut 5 personnes minimum avec des fonctions et des qualifications pour chacun.

Lorsqu'il y a 2 sas, si le poste de chef de sas est séparé, il faut 2 personnes.

❖ Un problème de la réglementation concerne l'équipe minimale requise en conditions de saturation notamment en plongée. Le texte dit qu'il est nécessaire d'avoir 6 opérateurs supplémentaires sans préciser leurs fonctions ni la durée des postes de travail. Au lieu de donner ce type de prérogatives, il faudrait nommer les différents postes requis sur ce type de chantier et préciser leurs fonctions ainsi que la durée des postes (12 x 12 comme en offshore ou 3 x 8 ? cela change considérablement le nombre de personnes impliquées… qui et plus proche de 20 que de 6).

Formation (personnes et matériel)

Pour les travailleurs de la mention D, classe 1 (tubistes pouvant être comprimés jusqu'à 3 bar), la formation dure 1 semaine. A partir de prérequis inexistants (savoir lire et écrire…et encore). Puisque rien n'est obligatoire en termes de pré requis, tout dépend de la tâche à laquelle ils vont être affectés ensuite.

Des formations complémentaires (non sanctionnées par des certificats) sont nécessaires pour occuper les fonctions suivantes

- Chef des opérations hyperbare (COH)
- Chef de sas

L'employeur doit s'assurer qu'il donne ces fonctions à des gens qui en ont les compétences.

Pour suivre une formation de chef de sas, les prérequis sont d'être techniciens avec une formation complémentaire et d'avoir suivi la formation de tubiste mention D classe 1 (même sans aptitude médicale et donc éventuellement sans mise en pression).

Le COH est un encadrant responsable amené à prendre des décisions et à gérer des situations, il est de niveau technicien supérieur ou ingénieur, chef de sas et tubiste.

Remise à niveau des connaissances sur l'utilisation des matériels (entretien, maintenance, réparation, etc.) : à chaque nouveau chantier, les personnels sont recyclés, reformés.

Création d'un conseiller à la prévention hyperbare (CPH) pour chaque mention.

Ce poste de CPH présente une énorme difficulté pour la mention D. Le texte dit qu'il peut être le chef d'entreprise s'il y a moins de 10 personnes, sans préciser s'il s'agit de l'effectif total du groupe ou du nombre d'hyperbaristes.

Pour une entreprise de plus de 500 personnes, avec 10 scaphandriers ou hyperbaristes, le chef d'entreprise ne va pas s'aventurer à jouer le rôle de CPH.

Mais qu'en est-il pour un chantier de tunnel ? Un chantier tunnel est toujours organisé à partir d'un groupement d'entreprises constitué pour une durée déterminée (la durée du chantier). Un directeur est nommé à la tête de ce groupement qui va créer un manuel de sécurité hyperbare adapté au chantier et qui sera rédigé avec le conseiller à la prévention hyperbare qui intervient ponctuellement, en cas de nécessité à un moment donné. Attention dans ces conditions à ne pas obliger à ce que ce conseiller prévention soit nécessairement un membre du personnel de l'entreprise au risque que des personnes qui n'en aient pas la compétence occupent cette fonction. Actuellement cette fonction est systématiquement tenue par un Conseil extérieur.

Traçabilité :

Qu'est-il demandé concernant la documentation dans le décret ?

- Le document unique d'évaluation des risques (D.U.) qui sert à préparer le manuel de sécurité des opérations hyperbares (qui devrait être en annexe du D.U. puisque c'est la réponse à ce document), révisable annuellement et signé par le chef d'entreprise et le médecin du travail…
- Le manuel devrait être un document stable.
- Plan de prévention ou PPSPS (*plan particulier de sécurité et de protection de la santé)* :
    - Une entreprise qui intervient dans une autre entreprise en activité, les 2 chefs d'entreprise doivent se concerter, écrire ensemble et cosigner un plan de prévention qui prend en compte les risques spécifiques interférents (entreprise intervenante, entreprise utilisatrice et les autres entreprises qui peuvent être impliquées). C'est un document qui rappelle notamment les méthodes de plongée/techniques d'intervention hyperbares et renvoie au manuel de sécurité hyperbare.
    - Lorsque l'on est en situation « travaux neufs » (chantier en construction), un coordonnateur de sécurité est nommé par le donneur d'ordre et doit faire seul, un plan général de gestion de la sécurité qui reprend les risques apportés par chacune des entreprises qui interviennent, les risques propres au chantier et il est chargé d'imaginer les risques interférents. Chaque entreprise intervenante lui remet un PPSPS. Ce plan doit couvrir la construction, la vie de l'ouvrage et le démantèlement.
    - Lorsqu'une entreprise intervient sur un site qui n'est ni une entreprise en activité, ni un chantier de « travaux neufs », il n'existe plus rien en termes de plan de prévention. Vide sécuritaire sur les plans de prévention, alors qu'un document spécifique de chantier était requis par le décret de 1990 (Antérieur à 1992 et 1996).

- Fiche de poste : copie conforme du chapitre du manuel de sécurité hyperbare concernant une activité. Inutile

- Fiche de sécurité « exposition aux risques » (encore la même chose). Avant il existait une feuille d'intervention hyperbare remplie au fur et à mesure de l'intervention où étaient notés tous les paramètres de l'intervention. Cette feuille n'existe plus…Il aurait fallu conserver ces feuilles et préconiser une saisie informatique de leur contenu par l'employeur pour faire des statistiques, assurer une traçabilité…aider à l'actualisation du D.U.

Plutôt que de multiplier les documents redondants et recensant des informations peu pertinentes, il faudrait limiter le nombre de documents obligatoires en privilégiant l'intérêt de leur contenu et la simplicité de remplissage par les personnes concernées.

Le livret de plongée individuel est par exemple très important. Il faut bien établir qui le met en place, qui le remplit, qui le valide (attention à rompre le monopole de l'INPP sur l'édition de ce document) et d'un point de vue pratique, il faut faire attention à ce qu'il tienne dans la poche de la combinaison de travail pour inciter l'hyperbariste à l'avoir toujours sur lui lorsqu'il intervient dans un tunnelier et qu'il puisse le remettre au chef de sas pendant l'intervention.

INTERVENTIONS EN CONDITIONS HYPERBARES : EFFETS DE LA PRESSION ET TOXICITE DES GAZ

Dès que l'on intervient sous pression, il faut respirer à la pression où l'on est car les poumons sont soumis à cette pression.

La circulaire sur les équipements de protection individuelle (EPI) préconise pourtant que la combinaison du scaphandrier protège de la pression et c'est une aberration. Il faut que le plongeur soit soumis à la pression de son environnement de travail (ou alors qu'il travaille dans un sous-marin). Il faut donc supprimer le chapitre relatif à la plongée présent dans cette circulaire et renvoyer aux dispositions prévues par le code du travail quant aux activités en conditions hyperbares.

La protection contre les effets potentiellement délétères du séjour sous pression passe par la définition de procédures :

- Choix des gaz
- Méthodes d'accès
- Procédures de sortie
- La décompression
- …

1er effet de la pression : Dès que l'on est soumis à la pression, tous les volumes changent (loi de Mariotte)

1) L'organisme est soumis à des barotraumatismes :

- La protection conte ces effets passe en premier lieu par l'aptitude médicale initiale (les oreilles doivent être capables de s'équilibrer en pression) mais également l'aptitude médicale au quotidien puisque lorsque l'on est enrhumé par exemple, on ne peut pas équilibrer correctement ses oreilles.
- Une bonne formation est indispensable pour apprendre notamment à bien équilibrer ses oreilles, à savoir quoi faire dans le cas où cela ne passe pas et être sensibilisé à certains

risques, notamment le problème de surpression pulmonaire qui constitue le plus grave risque en plongée puisqu'il peut être mortel à partir de 5 mètres de profondeur suite à une remontée sans expiration qui peut induire la déchirure des poumons.

- Des procédures définissent les vitesses raisonnables auxquelles l'organisme peut être comprimé. Jean-Claude Le Péchon explique que sur les chantiers, dans le cas d'une descente « à sec », les gens se compriment eux-mêmes ce qui leur permet de réagir immédiatement et d'adapter la vitesse de compression si nécessaire (cette procédure n'est pas dans les textes réglementaires, c'est une mesure de sécurité propre aux chantiers).

2) La masse volumique du gaz augmente

Plus on descend en profondeur, plus la pression augmente et plus le gaz devient dense et difficile à respirer. La masse volumique d'un gaz est proportionnelle à la pression absolue.

Avec l'augmentation de la pression, toute une série de mécanismes physiologiques se mettent en jeu :

Avec l'augmentation de la masse volumique, l'effort inspiratoire s'accroit (perte de charge dans les voies aériennes). La ventilation alvéolaire devient difficile voire insuffisante impliquant que l'organisme n'élimine plus suffisamment le gaz carbonique. Ce gaz carbonique entraine une réaction réflexe qui augmente la fréquence cardiaque et la fréquence respiratoire induisant la ventilation d'un plus grand volume. En résulte la nécessité d'un effort respiratoire supplémentaire, les muscles respiratoires travaillent plus, donc la production de gaz carbonique augmente encore, alors qu'il n'est toujours pas bien éliminé. On se trouve dans un cercle vicieux.

Par ailleurs, étant donné que pour ventiler plus, il faut respirer plus vite, la ventilation alvéolaire devient encore plus insuffisante. Au final ces 2 boucles conduisent à un collapse des voies respiratoires, l'organisme est alors dans l'incapacité d'expirer et cela peut entraîner une perte de connaissance.

Cette perte de connaissance est assez facilement gérable au sec. Dans l'eau, c'est déjà plus compliqué puisque si elle n'est pas contrôlée, elle peut conduire à la noyade du plongeur.

→D'où l'intérêt de changer de gaz à partir d'une certaine pression et d'utiliser dans le mélange respiratoire, un gaz de masse volumique plus faible (un gaz plus léger) comme l'hélium par exemple pour pouvoir respirer à partir de 50 mètres.

→Pour contrer cette augmentation de la masse volumique des gaz, le décret a fixé une limite appropriée de densité à 9 g/litre (c'était la limite de densité de l'air à 60 mètres). Lors de plongée aux mélanges à l'hélium/oxygène la densité du gaz approche cette limite à une profondeur de 460 mètres environ, pour les mélanges ternaires, cette limite correspond à une profondeur de 180 mètres environ.

<u>2ème effet de la pression : chimie et pressions partielles de gaz</u>

La pression partielle d'un gaz, divisée par la pression absolue régnant au lieu de respiration correspond au pourcentage de ce gaz dans le mélange gazeux respiré (exprimé en valeur décimale).

Pour calculer la pression partielle d'oxygène dans une pièce à la pression atmosphérique, on multiplie donc le taux d'oxygène de l'air ambiant, 21% (=0,21 en valeur décimale), par la pression de respiration, 1 bar(a), ce qui donne une pression partielle d'oxygène de 0,2 1bar.

La pression absolue correspond à la pression totale que subit le plongeur sous l'eau. Il faut donc bien garder à l'esprit que pour transposer les profondeurs en pressions absolues, il faut ajouter 1 bar de pression atmosphérique lorsque l'on se trouve au niveau de la mer.

Lorsque l'on donne une pression partielle maximum admissible pour l'O_2 de 1,6 bar, pour calculer jusqu'à quelle pression il est possible d'aller en respirant de l'air comprimé, il suffit de diviser la pression partielle d'oxygène admissible par le pourcentage d'O_2 dans l'air comprimé respiré (21% = 0,21), ce qui nous indique que la pression maximum autorisée est de 8 bars (en pression absolue), ce qui correspond à une profondeur de 70 mètres.

La pression partielle des gaz est très importante pour la définition des seuils d'exposition de l'organisme au-delà desquels apparaissent les effets toxiques des gaz.

TOXICITE DES GAZ :

Puisque d'après la loi de Dalton, chaque gaz agit sous pression comme s'il était seul, les effets toxiques des différents gaz respirés ne vont pas sensiblement changer en présence les uns des autres, sauf peut-être pour le monoxyde de carbone (CO), qui est considéré comme un gaz trace toxique polluant, mais qui dans l'organisme, interfère avec l'oxygène dans les processus de transport et de métabolisme.

Toxicité de l'oxygène :

L'oxygène est une molécule très toxique pour toutes les cellules vivantes à partir d'une certaine pression partielle.

Le délai d'apparition des symptômes de toxicité dépend de 2 facteurs :

- la pression partielle d'oxygène
- le type de cellules : certaines cellules sont plus ou moins sensibles, à des pressions plus ou moins élevées (principe sur lequel est fondée la médecine hyperbare qui utilise notamment les propriétés toxiques de l'O_2 sur certaines bactéries).

Chez l'homme, en hyperbarie, 2 organes sont touchés en premier : le cerveau (effet Paul Bert) et les poumons (effet Lorrain Smith).

- Toxicité de l'O_2 sur le système nerveux central = exposition aigüe, pression partielle d'O_2 élevée

Effet Paul Bert : apparition de signes neurologiques pouvant aller jusqu'à la crise convulsive de type « épileptique ». Des signes avant-coureurs peuvent se manifester (troubles du raisonnement, hallucinations visuelles ou sonores). Si le plongeur se trouve dans l'eau au moment de la crise, il risque fortement de se noyer, mais si le travailleur est au sec, il encourt moins de risques, si ce n'est de se cogner en tombant ou en se débattant. C'est pourquoi les limites d'exposition sont différentes au sec et dans l'eau.

Des facteurs favorisants :

- la sensibilité de chacun, qui varie par ailleurs d'un jour à l'autre
- l'effet du gaz carbonique
- le froid et le chaud
- l'immersion qui masque les signes avant-coureurs

Comment peut-on quantifier le temps de tolérance ?

→Dans le cas des effets neurologiques, il n'est pas possible de prédire via un calcul le délai d'apparition de ces effets. Dans les ordinateurs de plongée, des calculs prédictifs de neurotoxicité sont donnés mais ils sont totalement faux. Il ne faut pas s'en servir.

Pour la prévention de l'apparition de ces effets, il ne faut pas exposer les hyperbaristes à une situation où ils encourraient un risque, des limites de pressions partielles d'O_2 sont donc fixées à :

- 1,6 bars maximum en immersion, sauf dans les situations de recompression en urgence pour le traitement d'un accident de décompression par réimmersion immédiate (non prévue actuellement dans les textes..) où il est possible d'aller jusqu'à 1,9 voire 2 bars de pression partielle d'O_2.
- 2,2 bars maximum au sec.
- 2,8 bars maximum au sec en situation médicale ou de traitement d'urgence d'un accident de décompression.

Les épileptiques sont déclarés inaptes à respirer de l'O_2 à des fortes pressions partielles, mais pas inaptes à la plongée à l'air par exemple.

Lorsque le sujet perçoit les signes avant-coureurs, il faut immédiatement passer sous air, et les symptômes vont disparaître.

Dans l'eau, cela implique d'être équipé d'un 2ème détendeur pour respirer de l'air alors qu'en caisson ou en bulle de plongée, il suffit de retirer le masque et de respirer l'air ambiant. En bulle de plongée, les plongeurs doivent par ailleurs toujours être attachés pour que la tête du plongeur ne rentre pas dans l'eau en cas de convulsions.

- Toxicité pulmonaire de l'O_2 = exposition prolongée, pression partielle d'O_2 plus faible

Effet Lorrain Smith : Beaucoup plus progressif que l'effet Paul Bert, il met des heures à s'installer et apparait à des pressions partielles d'O_2 beaucoup plus faibles que celles provoquant l'effet Paul Bert.

Le calcul de l'UPTD (unit pulmonary toxic dose = unité de dose toxique pulmonaire correspondant au dommage théorique de la respiration d'oxygène pur à 1 bar de pression partielle durant 1 minute) permet d'estimer la dose toxique pulmonaire accumulée suivant la pression partielle d'O_2 (en bar) et la durée de l'intervention sous pression, mais malheureusement ce calcul ne sait pas évaluer la récupération (des doses d'apparition de toxicité sont calculées, on sait que c'est réversible, mais on ne sait pas au bout de 2 heures quel est le taux de récupération).

Pour la prévention de l'apparition de ces effets, les valeurs maximales admissibles par jour en UPTD sont fixées à :

- 600 UPTD dans le cas général. Cette dose est responsable d'une baisse de capacité vitale de 2% pour 50% de la population. A partir de cette dose peuvent être estimés de manière approximative, en fonction des paramètres de l'intervention, au bout de combien de temps ou pour quelle pression partielle d'O_2 risquent d'apparaitre les effets toxiques pulmonaires. Cette dose correspond par exemple à une exposition de 10 heures à 1 bar d'O_2 pur.
- jusqu'à 1400 UPTD pour certaines expositions exceptionnelles ou pour certains traitements où l'on accepte une baisse de capacité vitale (réversible).

→ Au vu des 2 types d'effets toxiques de l'O_2 respiré sous pression = Les recommandations réglementaires pour la décompression à l'O_2 sont les suivantes :

❖ Plongée : 1,6 bars maximum avec des durées maximum possibles de plus 3 heures / dans le cas de décompressions plus longues (une dizaine d'heures), la pression partielle d'O_2 va être limitée à 0,8 bar.

- Au sec : 2,2 bars avec une durée maximum de 1 heure, si des interruptions avec de l'air ne sont pas introduites dans la procédure.
- Traitement médecine hyperbare : à titre d'exemple, le traitement d'un accident de décompression en chambre hyperbare peut être fait à une pression partielle d'O_2 de 2,8 bars.

Attention de ne pas parler de mélange ternaire hypoxique, c'est une aberration car un mélange ne devient hypoxique qu'à la pression où il va être respiré, pas dans la bouteille. C'est une terminologie couramment utilisée en plongée loisir pour désigner un mélange qui contient moins de 21% d'O_2, mais à la pression où il est respiré en plongée, il est toujours hyperoxique ! Il faudrait faire supprimer ce vocabulaire et garder à l'esprit que ce mélange sous-oxygéné ne doit pas être respiré à la pression atmosphérique (PO_2 minimal 0.16 bar).

Toxicité du gaz carbonique :

Il n'est pas très toxique en soi puisque l'organisme et notamment les poumons en contiennent beaucoup (40 hPa). La limite de toxicité est liée au renouvellement de l'atmosphère, puisque l'on suppose que le gaz que l'on respire est propre, il faut donc contrôler que l'air inspiré ne contient pas trop de CO_2. Dans le cas d'une intervention à sec par exemple, il faut assurer une ventilation adéquate de l'environnement hyperbare.

Les limites de toxicité (VME-Valeur moyenne d'exposition et VLE-Valeur limite d'exposition) du CO_2 sont données en concentration (p. cent ou ppm) à pression atmosphérique qu'il est judicieux de traduire en pressions partielles, exprimées en hPa (10^{-3} bar) qui seront valables quelle que soit la pression de respiration.

Les symptômes d'intoxication sont croissants avec l'augmentation de la pression partielle de CO_2 :

- Jusqu'à 10 hPa : Pas d'effet
- Entre 10 et 20 hPa : Un peu d'effet, mais très faible, ventilation légèrement accrue
- Au-delà de 20 hPa, cela devient inconfortable
  - A partir de 30 hPa : hyperventilation, rapidement réversible
  - Au-delà de 50 hPa : gêne importante, maux de tête, difficultés respiratoires croissantes pouvant aller jusqu'à la perte de connaissance

La valeur limite réglementaire maximale imposée pour la pression partielle de CO_2 est de 10hPa. Il faut donc vérifier que le gaz que l'on donne à respirer ne dépasse 10hPa, mais si cela dépasse temporairement (quelques instants et moins de 20 hPa), ce n'est pas grave.

Si le contrôle de la pression partielle de CO_2 est relativement aisé en atmosphère sèche, ce n'est pas le cas pour l'utilisation des recycleurs et le contrôle de la pression partielle de CO_2 dans la boucle de l'appareil. Pour l'instant, il n'existe aucun analyseur de CO_2 qui donne des pressions partielles fiables à long terme dans ces conditions.

Toxicité des gaz inertes :

- **Azote** : la narcose à l'azote commence à partir d'une exposition à une pression partielle d'azote supérieure à environ 4 bars (correspond approximativement à une plongée entre 30 et 40 mètres de profondeur à l'air). Il s'agit d'effets progressifs sur le système nerveux central : diminution des performances intellectuelles, perte de la mémoire immédiate, les

tâches multiples deviennent alors impossibles. Avec l'expérience, il est possible de maîtriser de mieux en mieux ces effets (pour des plongées jusqu'à 50 mètres à l'air et dans le cas où les conditions environnementales sont favorables).

- **Hélium** : le syndrome nerveux des hautes pressions (SNHP) est lié à la pression partielle d'He et à la vitesse de compression. En compression rapide en mélange Héliox, le SNHP commence à 180 mètres, mais dans le cas d'une compression raisonnable, les premiers signes apparaissent à partir de 300 mètres de profondeur (30 bars). Le SNHP ne concerne que la plongée très profonde. Les professionnels français de l'hyperbarie ne sont donc pas *a priori* concernés par ce syndrome puisqu'il n'y a pas de plongées à saturation au-delà de 300 mètres et que concernant les travaux en tunnels, les pressions maximales actuelles d'interventions se situent entre 5 et 7 bars.

  Les symptômes sont des tremblements musculaires, des contractions musculaires spontanées, sensation de fièvre, hallucinations sonores, signes EEG sérieux de souffrance cérébrale réversibles.

  Par ailleurs, l'hélium respiré pur est un gaz mortel. Suite à une erreur humaine, des britanniques ont envoyé de l'hélium pur aux plongeurs causant leur décès instantané, il a ainsi été précisé dans le décret de 1990, que l'hélium doit systématiquement être distribué mélangé avec au moins 2% d'O_2. L'hélium n'est donc jamais distribué pur.

  Cette mesure est une bonne mesure de sécurité mais elle complique considérablement la préparation des mélanges puisque dès que l'on ajoute de l'hélium on ajoute automatiquement de l'oxygène dont on connait approximativement la teneur. Elle empêche notamment l'utilisation d'hélium au-delà de certaines conditions de pressions où la présence de 2% d'oxygène n'est plus acceptable (au-delà de 300 mètres).

- **Hydrogène** : ce n'est pas un gaz inerte et il doit être présent à moins de 4% dans le mélange respiratoire à moins de risquer l'explosion. Il n'est pas utilisable à de fortes pressions partielles et ne peut concerner que des plongées à de très grandes profondeurs (300 mètres et au-delà). A partir de 25 bars de pression partielle d'hydrogène, survient l'apparition d'effets psychédéliques et d'hallucinations (comme le LSD).

Toxicité des polluants :

Sont ici concernés tous les contaminants des gaz/mélanges respiratoires. Les sources de contamination sont multiples :

→Fabrication de l'air comprimé respirable

Il est nécessaire d'être vigilant sur tout ce que le compresseur va aspirer et notamment de faire attention à l'endroit de la prise d'air. Il y a un risque de contamination par du CO et du CO_2, lors des prises d'air réalisées dans les arrières de garages, si le système d'aspiration d'air est positionné trop près du pot d'échappement du moteur du compresseur ; si l'on pompe à un endroit pollué (par exemple, faire attention aux alertes « pollution »).

Il faut vérifier que le compresseur ne produit pas de vapeurs d'huile (vérifier que l'huile soit adaptée). Il est par ailleurs nécessaire que le compresseur soit équipé d'un filtre de type charbon actif au moins pour piéger les vapeurs d'huile.

On obtient alors de l'air respirable (différent de l'air médical qui est extrêmement desséché).

→Lors de travaux en air comprimé dans un tunnelier,

L'outillage et les produits utilisés peuvent vaporiser dans l'ambiance des substances toxiques (CO, vapeurs métalliques, oxydes d'azote…). Il est donc nécessaire de contrôler tout produit qui va être mis en œuvre à l'intérieur de l'enceinte pressurisée. Des précautions sont donc à prendre en termes de surveillance de la composition de l'air, de la mise en place de systèmes de ventilation et d'aspiration des fumées de soudure ou de découpage arc-air, adéquates et du port de protections respiratoires par les hyperbaristes si nécessaire.

Dans la circulaire qui concerne la ventilation des lieux de travail, des valeurs limites d'exposition professionnelles (VLEP) sont définies pour les différents gaz polluants (en ppm et en mg/m^3), mais ces limites sont données pour une utilisation à la pression atmosphérique. Dans le décret de 1990, il était précisé que ces VLEP devaient être transformées en pressions partielles pour pouvoir être utilisées à la pression d'intervention, mais cette indication n'apparait plus dans le décret de 2011.

- Pour les ppm : [1ppm = 1µbar] on transforme la valeur en µbar et elle est ensuite utilisable quelle que soit la pression
- Pour les mg/m^3, c'est plus subtil
  - Si le mètre cube est mesuré dans le caisson, la valeur relevée correspond à des mètres cube de gaz comprimé et peut donc être utilisée directement ;
  - Si on l'analyse hors du caisson, la valeur correspond à des mètres cube de gaz détendu, il faut donc corriger cette valeur en tenant compte de la pression absolue appliquée à l'intérieur pour voir si elle est respirable ou non.

Pour contrôler les concentrations de ces polluants, des analyseurs de CO et de CO_2 sont mis en place sur les chantiers de tunnel, à l'extérieur de l'enceinte pressurisée (pression atmosphérique), au niveau d'une fuite créée à cet effet, puis les valeurs sont corrigées en fonction de la pression absolue à l'intérieur de l'enceinte.

Contrôles usuels réalisés en chantier tunnel :

- CO_2 : dans sas pendant la décompression (si elle n'est pas faite au masque à l'O_2)
- 1 ou plusieurs analyseurs de polluants suivant le type de travaux, le lieu du chantier…
  - Analyseur de H_2S (terrain pollué par de l'H_2S)
  - Analyseur d'hydrocarbures (terrain contaminé au kérosène)
  - Analyseur de méthane pas pour des raisons toxiques mais pour les risques d'explosion (terrain contenant du méthane)
- Pour le gaz/mélange gazeux respiratoire → un standard d'air respirable est calculé pour que les valeurs données (qu'elles soient en ppm ou en pourcentage) soient utilisables jusqu'à 60 mètres de profondeur (on sera donc trop protecteur sur des faibles profondeurs).

→Dans le cas des travaux immergés,

Le contrôle se fait sur les gaz/mélanges respiratoires préparés avant l'intervention (contrôle de ce qui a été aspiré par le compresseur). Les plongées profondes se font aux mélanges et impliquent l'utilisation de gaz purs dans lesquels il n'y a pas d'introduction de polluants.

→Recherche des polluants dans le cadre de la plongée aux mélanges :

- ❖ Si les mélanges sont constitués à partir de différents pourcentages de gaz purs, ils ne contiennent pas de polluants.
- ❖ Dans le cas où de l'air respirable est intégré à la composition du mélange, il l'est dans une proportion faible (20 à 30% maximum) et il est utilisable jusqu'à 5 bars. Dans ces conditions,

les polluants qui pourraient être présents dans le mélange resteront *a priori* à des niveaux de pressions partielles non préoccupants.

→Il faut néanmoins rester vigilant lors des prélèvements d'air en vue de la fabrication d'air comprimé respirable :

❖ en cas d'alerte pollution => attention aux niveaux de CO, oxydes d'azote ou CO_2 dans des environnements particuliers => par exemple sur une plateforme pétrolière où l'on extrait du gaz, la présence de traces d'H_2S qui deviennent toxiques sous pression est à surveiller sur le chantier.

→L'évaluation des risques au cas par cas permet de définir les axes de vigilance prioritaires, mais quoi qu'il en soit, pour être intégré aux mélanges en toute sécurité, l'air comprimé doit répondre aux exigences de composition et de qualité définies dans le standard d'air respirable jusqu'à 5 bars. A une exception près, les traces d'huile doivent être réduites au maximum si l'on fait du Nitrox avec cet air comprimé pour un problème de fabrication du mélange et de contamination des bouteilles avec un risque d'incendie

<u>Toxicité de la vapeur d'eau :</u>

Ce problème concerne uniquement les atmosphères dans lesquelles les hyperbaristes restent longtemps, les atmosphères de saturation.

Dans ces conditions, la présence d'une quantité trop importante de vapeur d'eau est responsable de maladies cutanées : infections des oreilles et de tous les plis cutanés avec du *Pseudomonas.* Pour pallier ce type de problèmes, la valeur d'humidité relative doit être maintenue entre 50 et 70%.

→Dans le cadre de l'utilisation des recycleurs, la présence de vapeur d'eau dans le gaz respiré est bénéfique puisqu'elle diminue la déperdition calorifique par évaporation.

→Pour les autres mélanges :

- <u>Air médical</u> : pas de vapeur d'eau car elle constitue un risque de contamination des canalisations par des microorganismes (ce n'est pas un problème respiratoire) et pour assurer une meilleure respiration, il est parfois nécessaire d'humidifier un peu l'air dans les masques des patients, qui ne respirent donc pratiquement jamais d'air médical….

LA DECOMPRESSION

Elle résulte de la loi de Henry qui décrit la dissolution des gaz dans les liquides.

La décompression induit des symptômes graves de la maladie de décompression qui sont liés à 2 facteurs :

- l'azote, dans le cadre d'interventions à l'air comprimé ;
- l'hélium, dans le cadre d'interventions profondes ;

L'oxygène est le facteur principal de prévention et de traitement.

La prévention repose sur l'utilisation de procédures de décompression dites « tables de décompression ». Un jeu complet a été publié en 1992, et remis en ligne en 2013, malheureusement sans qu'il ait été tenu compte de l'expérience acquise entre temps, ce qui aurait permis facilement de les améliorer sensiblement.

NATURE DES GAZ UTILISES

Définition des gaz/mélanges respiratoires autorisés lors des interventions en conditions hyperbares :

→Pour la plongée aux mélanges, au lieu de parler des gaz utilisables, il suffirait de préciser les pressions partielles maximales autorisées pour chaque gaz contenu dans les différents mélanges utilisés.

→Pour la plongée aux mélanges ternaires, il pourrait être précisé que la pression partielle d'azote maximale autorisée est celle de l'air à 50 mètres.

Mention A :

- Nitrox
- Air comprimé
- Héliox, voire peut-être du Trimix, mais cela concernerait des travaux réalisés à plus de 50 mètres de profondeur et Jean-Claude Le Péchon n'a pas connaissance de la réalisation de ce type de travaux actuellement en France.

Mention B :

- Nitrox : Une table réglementaire pour les corailleurs, au mélange ternaire, a été publiée en 1995 par le Ministère de la Mer contre l'avis du Ministère du travail, puisque cette table est dangereuse. C'est une table de plongée en tourelle avec de l'oxygène à 1,2 bar. Elle n'est donc pas adaptée et heureusement, n'est pas utilisée. La plupart des corailleurs font de la décompression de surface (sortent de l'eau et se remettent dans un caisson à l'O_2 pur).

- Trimix :
  - Gaz privilégié par les corailleurs (mention B, section pêcheurs)
  - Problème des moniteurs de plongée qui ont une formation pour faire de la plongée trimix avec des tables informatiques ordinateurs de plongée.

Mention C :

- Air comprimé
- O_2 à la décompression

Mention D :

En France sont utilisés

- Air comprimé
- O_2 à la décompression

Type de tables de décompression/ Ordinateurs utilisés

Les limites de la toxicité de l'oxygène intégrées dans les ordinateurs de plongée ne sont pas pertinentes (la toxicité neurologique n'est pas proportionnelle à la durée).

La seule limite intéressante à avoir en plongée est une alarme à 1,5/1,6 bar, elle est utile car elle prévient que le plongeur dépasse le seuil de toxicité neurologique de l'oxygène définit réglementairement.

Les limites de durées pour l'utilisation de l'oxygène sur les ordinateurs ne sont pas utiles car en respectant les UPTD, il faudrait des durées considérables pour arriver à l'apparition des effets toxiques pulmonaires de l'O_2.

Le ministère du travail n'utilise pas, à tort, la terminologie usuelle pour parler des ordinateurs de plongée (« dispositif électronique de suivi de décompression ») et il donne à l'employeur la responsabilité de la gestion de ces systèmes alors que l'employeur n'est (dans la majorité des cas) jamais sur le chantier. En revanche, il serait utile de préciser dans le texte qu'il faut homogénéiser les matériels sur le lieu de travail et laisser à l'employeur la responsabilité du choix de cet appareil.

Pour optimiser la sécurité d'utilisation des mélanges, il serait bien de développer la recherche et les études sur l'amélioration des tables de décompression, au moins épidémiologiques, à partir des feuilles de plongée ou d'intervention hyperbare.

Mode de fabrication et modalités d'analyse des gaz

Avant l'exposition, il faut s'assurer que les gaz/mélanges respiratoires sont conformes.

Pendant l'exposition :

- A sec : dans les installations de type caissons, *etc.,* il est facile de faire des analyses.
- En immersion :
    - Au narguilé : il est facile d'analyser le gaz que l'on envoie au fond.
    - En scaphandre autonome à circuit ouvert et en recycleur : c'est plus compliqué d'avoir une analyse en temps réel.

  La norme sur les recycleurs veut qu'il y ait un analyseur d'oxygène, même s'il ne pilote pas l'appareil.

→Concernant l'approvisionnement en gaz,

Pour la mention A, il n'est pas nécessaire d'acheter des mélanges tout faits mais continuer à utiliser des compresseurs sur site. En effet, il serait contraignant de transporter, payer, stocker des mélanges gazeux alors que les mélanges ternaires utilisés sont à 50% de l'hélium complété avec de l'air et un peu d'oxygène (l'air étant notamment gratuit). Ce point est à moduler suivant le type de chantiers.

- Sur des chantiers courts (une manipulation à faire) : achat de mélanges directs.
- Sur des chantiers longs et en sites éloignés : il est plus intéressant de fabriquer les gaz sur site avec le matériel approprié en y associant les contrôles adéquats.

→Caissons hyperbares et risque d'incendie

Mention des problèmes de risque d'incendies qui concernent uniquement l'utilisation des caissons. Pour contrer ce problème, une règle internationale établit qu'il ne peut pas y avoir plus de 25% d'oxygène dans une atmosphère hyperbare. Par ailleurs, la présence d'hélium dans l'atmosphère hyperbare diminue considérablement le risque d'incendie.

EFFETS SANITAIRES RECENSES LIES A L'EXPOSITION DES TRAVAILLEURS AUX CONDITIONS HYPERBARES / ACCIDENTOLOGIE

1) Typologie des accidents

Mention A :

- Il s'agit principalement d'accidents en situation hyperbare, ce sont des accidents du travail, liés notamment à l'activité du scaphandrier sous l'eau ou liés à l'hostilité du milieu de plongée :
    - présence d'animaux dangereux
    - conditions météorologiques défavorables
    - traumatismes - systèmes d'aspiration sous l'eau – parmi les scaphandriers de la mention A, beaucoup d'accidents mortels ce sont avérés liés à ce danger

De par leur nature, les accidents du travail en situation hyperbare ne peuvent pas être secourus de la même manière que les accidents du travail classiques.

Il est plus difficile de faire face à ce type d'accidents qu'aux accidents de plongée, cela nécessite l'élaboration de plans de prévention avec un suivi rigoureux des procédures et une traçabilité écrite de tous les processus mis en œuvre.

2) Cause des accidents de plongée :

Les erreurs de procédures, erreurs de décompression, paniques, matériels défectueux causent des accidents de plongée.

Chez les scaphandriers de la mention A, les erreurs de procédures sont assez rares.

Environ 450 accidents de décompression (AD) ont été recensés en 2013 dans les centres hospitaliers équipés d'une installation hyperbare. Parmi ces AD, 18 sont annoncés comme professionnels, *a priori* des moniteurs de plongée pour une grande partie. Par ailleurs, ces statistiques ne prennent pas en compte les accidents traités sur place (en caisson sur site), mais *a priori* il n'y en a pas ou très peu.

Ces statistiques sont publiées par la commission médicale de la FFESSM dans les statistiques d'accident de décompression de plongée de loisir.

3) Gravité

Les statistiques de la FFESSM donnent des résultats sur la gravité :

- 20% de séquelles sérieuses pour les accidents neurologiques
- 10% de séquelles mineures

La plupart des accidentés sont remis sur pieds et autorisés à plonger de nouveau.

Les statistiques de décès dans le cadre d'accidents de plongée montrent qu'ils sont très rares. Ce faible taux est notamment lié aux procédures de sécurité mises en place et aux types de plongées faites en France, qui ne sont pas très profondes, et aussi sans doute au fait que les décédés en plongée ne viennent pas à l'hôpital et ne sont donc pas pris en compte dans les données statistiques ci-dessus.

4) Prise en charge de l'accident

Présence d'un caisson sur site :

D'après la réglementation, à partir du moment où des paliers de plus de 15 minutes sont à faire, il faut que le caisson soit à moins d'une heure (autrement dit sur place puisqu'il est parfois difficile d'évaluer le temps réel nécessaire pour rallier le caisson hospitalier le plus proche). La présence d'un caisson sur le chantier/site de plongée est donc bénéfique en termes de sécurité mais demande une organisation associée pour faire fonctionner le caisson à tout moment.

Certains médecins ne sont pas favorables à la présence de caissons sur site.

→Le problème se pose pour les moniteurs de plongée loisir lors des plongées profondes qui nécessitent donc de faire des paliers d'une durée supérieure à 15 minutes. Les employeurs des moniteurs de plongée loisir ne sont pas en mesure de mettre en place des caissons de décompression dans les clubs de plongée pour des raisons financières et par manque de personnel qualifié pour leur manipulation.

Concernant la qualité et la rapidité des soins administrés, il y a encore peu de retours et d'expérience sur les traitements en caissons de chantiers, mais cela provient du fait que les symptômes sont presque toujours immédiatement résolus.

5) Suites de l'accident

Le suivi médical est assuré par la médecine du travail et la médecine hyperbare.

Contre-indication médicale spécifique ?

Des réductions d'aptitudes à l'intervention sous pression peuvent découler des accidents et en cas de séquelles médullaires, l'inaptitude est prononcée définitivement. Il peut en être de même lorsqu'un *Foramen Ovale* perméable est détecté à la suite d'un accident de décompression par ailleurs non expliqué…

Mention D :

- dans les tunneliers, les traumatismes graves de type fractures de la colonne vertébrale seraient très difficiles à secourir. Bien que des procédures de secours existent (y compris parfois des simulations), elles n'ont pour le moment jamais été mises en œuvre, l'accent est mis sur la prévention de ce type d'accidents avec le port de harnais de sécurité, échafaudages…

Accidentologie : Il y a probablement 2 accidents de décompression de tubistes dans l'année (1 a été amené au Val de Grâce par erreur après un palier de décompression omis / 1 sur un chantier à Lyon ; traité sans suites).

OPPBTP - Organisme professionnel de prévention du bâtiment et des travaux publics

M. Eric LE MAITRE – Ingénieur conseil hyperbarie pour la Direction technique de l'OPPBTP
Date de l'audition : 25/11/2013
Lieu de l'audition : Paris

POPULATION PROFESSIONNELLE

Effectif et Mention des plongeurs du BTP :

Les travailleurs concernés sont ceux de la mention A, classe 2, en métropole.

Les plongeurs du BTP représentent 450 ETP en métropole (scaphandriers) dont la moitié sont intérimaires.

Description des métiers et activités représentés :

On recense en France environ 160 entreprises dites de « travaux immergés », dont seulement 80 auraient des activités continues dans ce domaine.

En métropole, 80% des travaux sont situés à une profondeur entre 0 et 12m. Le système de plongée privilégié est donc le narguilé (quasiment 100%). Il concerne les travaux subaquatiques de découpage, soudage, levage, construction, réparation, entretien, visite d'ouvrages en milieu maritime, fluvial, lacustre ou industriel (tous types de liquides).

Depuis octobre 2012, le narguilé est imposé réglementairement sur ce type de chantiers. Quelques exceptions en plongée autonome demeurent néanmoins, sous couvert de l'obtention d'une autorisation spéciale de l'inspection du travail (dûment justifiée : courant, profondeur, durée d'intervention faible). Une fois la demande d'autorisation envoyée, l'inspection du travail a 15 jours pour donner son accord.

Un problème dû à la systématisation d'une méthode unique, dans des profondeurs usuelles entre 0 et 12 mètres, c'est que lorsque les plongeurs sont amenés à sortir des sentiers battus et à plonger avec des techniques différentes, à des profondeurs différentes, ils manquent d'entrainement ce qui peut poser des problèmes en termes de sécurité.

Profil des travailleurs (Age moyen, Nb moyen d'années de travail par travailleur)

C'est une population très mobile, amenée à se déplacer de chantiers en chantiers puisque le travail est organisé principalement sur des chantiers ponctuels, d'une journée le plus souvent.

D'après les résultats d'une enquête de l'OPPBTP datant de 2009-2010, les travailleurs ont une moyenne d'âge de 40 ans avec une ancienneté moyenne de 11 à 12 ans dans la profession. En termes de durée de carrière professionnelle, les extrêmes s'étendent de 2 à 35 ans. Il y a un néanmoins un problème pour le renouvellement de la population des scaphandriers (Mention A, Classe 2) qui restent seulement 1 à 2 années dans la profession.

Ceci est expliqué en grande partie par le fait que l'INPP forme une centaine de scaphandriers par an au CAH (certificat d'aptitude à l'hyperbarie), le marché ne pouvant en absorber que 60 environ. Le CAH est un certificat de sécurité, autorisant les travailleurs à plonger sur un chantier de travaux immergés mais cela ne constitue pas une qualification. Ils ne sont donc pas employables en l'état puisque le projet professionnel n'est pas intégré dans la formation. Par ailleurs, compte tenu du décalage entre la réalité de l'activité (plongée dans les égouts, dans du courant, dans des zones turbides…) et le projet professionnel des scaphandriers, les nouveaux scaphandriers exercent seulement 1 à 2 ans et quittent la profession. Le « rêve » de l'offshore n'est pas à la portée de ces plongeurs puisque pour être recruté sur ces activités, il faut déjà être qualifié.

Il serait intéressant de s'inspirer de la formation des travailleurs des tunneliers (mention D), qui sont qualifiés via des formations dispensées directement au sein de l'entreprise qui les recrute et sont donc directement employables.

Nb moyen de jour de travail/d'interventions par an

Les travailleurs plongent en moyenne une centaine de fois par an.

Un problème en matière de sécurité concerne les plongeurs intérimaires qui ne travaillent en moyenne que 24 jours sur l'année et qui manquent donc d'entrainement. Pour les extrêmes, certains n'auront aucun jour de travail dans l'année alors que d'autres vont travailler toute l'année.

Les interventions ont lieu pour la plupart dans les eaux intérieures (peu d'interventions maritimes) et sont organisées par des entreprises de taille importante. Les interventions en milieu maritime ont lieu sur la façade méditerranéenne pour la plupart, et sur la côte atlantique pour le reste. Les entreprises concernées sont de petites structures qui réalisent ces travaux de manière anecdotique, à la demande et cela peut poser des problèmes en termes de sécurité.

TECHNIQUES D'INTERVENTION EN CONDITIONS HYPERBARES

1) Type de matériel utilisé

Narguilé

Pour les interventions menées entre 0 et 12 mètres, les travailleurs respirent principalement de l'air comprimé.

Pour certains chantiers ponctuels plus profonds, les plongées peuvent être réalisées au Nitrox pour des profondeurs au-delà de 20 mètres. C'est par exemple le cas pour des interventions à 30 ou 40 mètres de profondeur sur les barrages.

De manière générale, les plongeurs n'utilisent pas d'Oxygène à la décompression, mais sur certains chantiers particuliers, ils peuvent être amenés à faire des paliers à l'O2 à la remontée.

Avantages/inconvénients de la plongée au narguilé

L'avantage professionnel de la mise en œuvre de la plongée au narguilé est qu'elle permet une transmission directe des ordres/consignes de la surface vers le plongeur et parallèlement, elle permet une liaison continue entre la surface et le fond.

L'inconvénient de ce type de plongée est qu'elle peut être contrariée/rendue dangereuse par les conditions extérieures, notamment tout ce qui risque d'entraver ou d'emmêler le tuyau du narguilé (courant, tronc arbres et obstacles divers…).

Recycleur

Certains travaux « niches » nécessitent des compétences supplémentaires (changements de gaz, de techniques de plongée…). Ceci explique les demandes d'autorisation d'utilisation des recycleurs notamment. C'est par exemple le cas pour des travaux immergés dans des galeries, qui réclament des plongeurs qualifiés pour mettre en œuvre de techniques de plongée particulières.

La formation des plongeurs de la mention A, classe 3 n'est pas appropriée pour ce type d'activités. Il est nécessaire de mettre en place des formations plus spécifiques, de former une élite qualifiée pour l'utilisation des matériels différents dans des conditions particulières.

Systèmes :

Des bulles de plongée sont utilisées pour certains travaux (voir avec Jean Lelièvre d'hydrokarst).

Apnée :

Les chantiers de ce type sont anecdotiques dans le domaine des TP.

Officiellement il n'y en a aucun, mais il est possible d'avoir des chantiers dans 1 à 2 mètres d'eau, notamment dans le cadre des opérations de grattage de bateaux dans les ports.

2) Maintenance du matériel

EPI, casque, tenue, communication

L'idéal aurait été de monter une prévention autour du système respiratoire (depuis la source de gaz jusqu'au plongeur) mais le Ministère du travail a borné la prévention aux EPI qui pour les travaux immergés sont le casque et le détendeur, l'alimentation de secours, la communication, la tenue pour protéger le plongeur du froid et du chaud mais il n'y a pas de connexion entre la surface et le fond.

Il existe des réglementations qui encadrent les opérations de maintenance en surface, les opérations de maintenance sur les EPI du plongeur assurant sa sécurité en plongée, mais rien n'est défini entre les 2, par exemple il n'existe pas de préconisations d'entretien ni aucune procédure concernant la maintenance du tuyau du narguilé.

Compresseur et bouteilles

Les gaz de plongée (air comprimé) sont fabriqués par des compresseurs en surface. L'air est notamment prélevé pour être ensuite comprimé. Le reste des gaz utilisés est acheté directement auprès d'un fournisseur (Air liquide par exemple).

La prise d'air avant la compression est une étape déterminante sur la qualité finale des gaz fabriqués. Il faut être très vigilant sur le moment et le lieu de la prise d'air (exemple d'une prise d'air réalisée au moment du dégazage d'un chalutier et qui a entrainé une pollution importante de l'air comprimé).

La tendance est plutôt à la diminution de l'utilisation des compresseurs dans les entreprises qui privilégient l'utilisation directe de bouteilles de gaz et de mélanges déjà préparés.

Un contrôle des gaz et mélanges gazeux avant l'utilisation doit normalement être réalisé (teneur en O_2, N, He…), non seulement si les gaz ont été fabriqués sur place, mais également s'ils ont été achetés. Les gaz dangereux (CO et CO_2 notamment) devraient être contrôlés systématiquement car de par leur toxicité en conditions hyperbares, ils peuvent être à l'origine d'accidents mortels. Il faudrait que ce type de contrôle soit intégré dans les contrôles avant plongée exigés par la réglementation.

Modalités - traçabilité – Prophylaxie

Il n'existe aucune obligation réglementaire concernant la désinfection des EPI et du matériel dans le cadre de la mention A. Des procédures sont en revanche bien définies dans le cadre de la mention C.

Suivant la taille des entreprises, le matériel ne sera pas nécessairement individuel et pourra être passé d'un travailleur à l'autre sans procédure précise de désinfection. Certaines entreprises désinfectent systématiquement les EPI collectif dans des bains de septivon, mais il n'y a aucune procédure normée.

Problème de matériel à signaler ?

De moins en moins de problèmes concernant le matériel depuis la nouvelle réglementation qui impose notamment que le matériel soit identique pour les plongeurs de secours et le plongeur au travail.

Il serait judicieux de recommander une harmonisation des matériels au sein d'une même entreprise, notamment les matériels qui touchent aux gaz respiratoires (détendeurs et ordinateurs de plongée) pour favoriser une meilleure connaissance de l'utilisation des systèmes par les travailleurs.

Attention, sur certains chantiers, les travailleurs viennent avec leur propre matériel, notamment les intérimaires. La multiplicité des matériels de plongée sur un même chantier est source d'accidents.

Par ailleurs, certains plongeurs bricolent leur propre matériel et ce type de pratiques est dangereux. Dans le cadre d'une utilisation professionnelle, il n'est pas possible d'autoriser les travailleurs à plonger avec du matériel qu'ils ont bricolé.

3) <u>Description de l'activité/du type de chantier</u>

Equipe minimale sur le site (pour encadrer les interventions)

Pour l'organisation d'un chantier de travaux publics, la réglementation exige 3 personnes minimum sur le chantier avec la présence des 5 fonctions suivantes, quelle que soit la situation (en situation normale de travail, en situation dégradée- en cas de problème de matériel- ou en situation de secours) :

- Scaphandrier (opérateur)
- Aide opérateur
- Secours
- Surveillant de plongée
- Chef des opérations hyperbares (COH)

Compte tenu des problèmes de quantité de personnel, il est possible pour les travailleurs de cumuler plusieurs fonctions sur le même chantier. La même personne peut donc être amenée à assurer plusieurs fonctions différentes sur un chantier dans la même journée et également d'un chantier à un autre. Ceci pose des problèmes organisationnels et crée la confusion pour le travailleur sur les rôles qu'il doit assumer suivant chaque fonction qu'il est amené à exercer. Il serait judicieux d'intégrer ces notions de « glissements » de fonction au cours de la formation des personnels.

Dans la formation de base CAH, les plongeurs vont être formés à toutes les fonctions qu'ils pourront occuper sur un chantier, y compris le COH. En revanche, c'est l'entreprise qui désigne le COH. Théoriquement, un plongeur sortant de la formation ne devrait pas être désigné COH car il n'a pas encore l'expérience requise.

Certification des entreprises

D'après la nouvelle réglementation (arrêté sur les travailleurs de la mention A, en voie de publication), les entreprises proposant des travaux immergés en intérim doivent, au même titre que les entreprises de travaux immergés, être certifiées. Ceci devrait permettre d'assurer une réorganisation administrative de ces entreprises et un encadrement plus strict des personnels intérimaires (formation et sécurité).

Il existe également des sociétés d'auto-entrepreneurs qui proposent des activités de petits travaux sous-marins. Réglementairement, c'est une activité interdite d'une part, puisque par définition, un auto-entrepreneur est seul dans sa société alors que le minimum requis sur un chantier de travaux immergés est de 3 personnes et d'autre part, puisque ces entreprises ne peuvent obtenir une certification. Un travail d'information auprès des maîtres d'ouvrage est en cours pour les inciter à vérifier la conformité réglementaire des entreprises avec lesquelles ils travaillent.

Le cas de l'approvisionnement des chantiers en O2

Dans les procédures de secours, il est obligatoire de disposer d'O2 normobare sur un chantier. D'après la législation, pour se fournir en oxygène normobare sur les chantiers, les entrepreneurs devraient normalement bénéficier d'une ordonnance prescrivant l'utilisation de ce gaz. La question a été éludée, mais n'est toujours pas résolue réglementairement et peut poser un problème d'accès à l'oxygène pour certains chantiers.

4) Conditions d'utilisation

Pour les travailleurs intervenant entre 0 et 12 mètres (la majorité des chantiers), la durée d'intervention quotidienne est de 3h en moyenne, sur poste fixe. Les travailleurs intervenant plus profondément ont des durées de plongée plus courtes (respect des tables MT).

Il y a également une diminution du temps de travail définie par la réglementation en fonction des conditions de plongée (température de l'eau, manutention d'appareils lourds, courant…).

L'air (surtout utilisé sur la tranche 0-12 mètres) et le nitrox sont utilisés entre 0 et 50 mètres pour les travailleurs de la mention A, classe 2 et pour des profondeurs supérieures à 50 mètres, ce sont des travailleurs de la classe 3 qui plongent aux mélanges gazeux respiratoires autres que l'air.

5) Formation (personnes et matériel)

Actuellement, la formation des scaphandriers pour l'obtention du CAH dure 8 semaines et consiste à apprendre à être en sécurité pour eux et pour les autres dans l'eau, sur un chantier de travaux immergés. Ils suivent une formation sur les dangers, les procédures, les tables de plongée, les manipulations et l'organisation d'un chantier.

Selon l'avis d'Eric Le Maître, la formation idéale des scaphandriers devrait consister dans un premier temps à apprendre à plonger (appréhension du milieu aquatique) puis dans un second temps, à apprendre à travailler sous l'eau.

En 2014 est prévue la sortie d'un titre professionnel qui reconnaitrait un niveau de formation de base pour les plongeurs de la mention A, intégrant tous les aspects de sécurité de base en plongée. Cette formation professionnalisante en cours d'aménagement, présentera pour seule limite d'entrée, l'aptitude médicale de la personne pour la plongée. Les enseignements seront ensuite adaptés suivant le niveau de plongée de chacun et permettront l'obtention d'un titre de base de scaphandrier. Les scaphandriers devraient ensuite avoir la possibilité d'obtenir des niveaux de qualifications supplémentaires via le passage de « spécialités » (utilisation de recycleurs par exemple).

Actuellement, l'entrée en CAH à l'INPP, se fait sous réserve d'avoir déjà un niveau de plongée sportive de 3 ou 4 (correspondant à la pratique sportive de plongée à 40-50 mètres).

En Europe, les formations des scaphandriers durent 8 à 12 semaines (suivant les prérequis demandés) et certaines ont une approche différente (par exemple la Belgique, qui dispense une formation reconnue en France) intégrant, en même temps que l'apprentissage de la plongée et du milieu aquatique, l'apprentissage du travail sous l'eau (chaud, froid, électricité…).

Remise à niveau des connaissances

Jusqu'à présent, le CAH était valable 10 ans au bout desquels un renouvellement administratif était fait par l'INPP sur la base de l'historique plongée du scaphandrier.

Avec la nouvelle réglementation, le CAH ne sera plus valable que 5 années et sera renouvelé sous couvert d'une remise à niveau des connaissances dispensée au scaphandrier et dont le contenu devrait être adapté suivant l'historique plongée et notamment la régularité des plongée. Cette démarche s'inscrit dans un souhait de la profession d'un contrôle plus rigoureux de l'activité et des connaissances de ses plongeurs.

Si les travailleurs sont maintenant soumis à une remise à jour des connaissances en termes de sécurité et qu'ils ne réussissent pas ce test, ils n'auront pas la possibilité de se reconvertir, de faire valoir leurs acquis et leur expérience puisqu'il n'y a pas de reconnaissance de la qualification de base de scaphandrier. Le fait d'instaurer un niveau de formation de base permettrait de leur assurer une possibilité de reconversion.

Traçabilité des parcours :

Les scaphandriers doivent consigner les informations relatives à leurs interventions subaquatiques dans un livret de plongée individuel tamponné par l'entreprise. Mais dans la pratique, les travailleurs ne le remplissent pas ce qui induit une perte de la traçabilité des parcours.

La nouvelle réglementation va imposer une remise à niveau des connaissance et donc une traçabilité consignée via le livret de plongée qui devra être tenu à jour par chaque plongeur. Actuellement, le seul livret faisant foi est celui de l'INPP qui est très cher mais d'autres livret devraient être reconnus d'ici peu pour casser le monopole actuel.

Des réorganisations en cours en lien avec la mise en place des fiches expositions/risques devraient également permettre d'avoir une traçabilité des parcours via la médecine du travail.

La mise en place d'une base de données nationale de référence pourrait être très intéressante mais semble très complexe.

Formation de sauveteur secouriste du travail (SST)

Les préventeurs souhaitent mettre en place une formation de SST-hyperbare pour tous les scaphandriers, qui comprendrait un volet oxygénothérapie et permettrait d'acquérir une connaissance du minimum de la prise en charge d'un accident de décompression (notamment l'usage d'O2 normobare). Un dossier en ce sens a été soumis à l'INRS il y plus d'un an et reste sans réponse pour le moment.

Une formation aux 1ers secours est dispensée à l'INPP, mais elle n'est pas obligatoire mais elle n'impose pas de remise à niveau des connaissances pour les travailleurs que ce soit pour la mise en œuvre des caissons ou l'utilisation de l'O2 normobare.

Dans le domaine de l'hyperbarie, la formation continue n'est obligatoire que pour les médecins hyperbaristes.

<u>NATURE DES GAZ UTILISES</u>

- **AIR** (+++) : 0 à 12 mètres

- **NITROX** (++) : anecdotique, jusqu'à 50 mètres
  Cette technique permet de diminuer les risques de narcose à l'azote, de diminuer les temps de paliers, mais parallèlement, le risque de toxicité à l'oxygène est augmenté.

- **O2** : paliers en décompression possibles, mais pas particulièrement développés dans cette population
  Cette technique présente un risque si elle est mal manipulée, notamment concernant la mauvaise gestion possible de la PPO2 et de sa toxicité potentielle.

Type de tables de décompression/ Ordinateurs utilisés

Ce sont les tables MT qui sont utilisées, sauf pour des travaux spécifiques pour lesquels il est possible de faire une demande d'utilisation d'une autre table (demande d'agrément temporaire). C'est à la demande des professionnels que le Ministère du travail a inscrit la table MT dans la

réglementation, afin d'obliger les entreprises à suivre à minima cette table. La nouvelle réglementation autorise l'utilisation d'autres tables pour plonger hors « table MT ».

Les ordinateurs de plongée ne sont pas utilisés pour la plongée au narguilé.

Associée à l'utilisation des recycleurs, vient l'utilisation des ordinateurs de plongée. Si celle-ci peut sembler aisée, elle pose en réalité un problème de sécurité en risquant de faire perdre tout sens critique au travailleur qui l'utilise concernant la gestion des paramètres de sa plongée. Par ailleurs, les algorithmes de calcul à l'origine de la construction des schémas de plongée ne sont pas connus par le plongeur.

Aucune norme n'existe pour le moment sur les tables intégrées dans ces ordinateurs de plongée. Sachant qu'elles peuvent être à l'origine d'accidents, il faudrait pouvoir vérifier que ces tables sont validées.

Pour certains profils de plongée particuliers (type plongée en galeries et spéléologues) pour lesquels l'utilisation du recycleur et d'un ordinateur de plongée est pertinente, comment sécuriser les plongées ? Les normes internationales autorisent l'usage des recycleurs jusqu'à 120 mètres de profondeur. Il faut continuer à former les plongeurs sur l'utilisation des tables et favoriser le développement de leur esprit critique sur les calculs issus de l'ordinateur de plongée.

EFFETS SANITAIRES RECENSES LIES A L'EXPOSITION DES TRAVAILLEURS AUX CONDITIONS HYPERBARES / ACCIDENTOLOGIE

Circonstances de survenue (accidents EN plongée /accidents DE plongée)

Dans le cadre des travaux BTP en immersion, les accidents recensés sont principalement des accidents EN plongée et non des accidents DE plongée, de par la nature des opérations effectuées sous l'eau. Ce sont des accidents du travail (coupures, chutes, écrasements…).

La majorité des accidents ont lieu :

- en surface au moment de la mise à l'eau ou de la remontée après plusieurs heures de travail, principalement en lien avec l'encombrement et la lourdeur des équipements de plongée ;
- au fond, en lien avec la manipulation dans des conditions plus ou moins favorables (courant, manque de visibilité, froid…) des outils de travaux publics (brûlures, coupures, chocs…).

Parmi les accidents spécifiques à la plongée recensés, on trouve principalement des accidents barotraumatiques, au niveau des oreilles notamment. Un accident de décompression a été recensé.

Concernant les accidents biochimiques, des effets visuels transitoires liés à la plongée à l'O2 seraient décrits par certains travailleurs, mais aucune remontée au niveau international sur cette question.

Nombre, incidence

L'incidence est difficile à estimer. Les arrêts de travail liés aux accidents du travail sont enregistrés par la médecine du travail mais sont difficiles à recenser spécifiquement car dilués dans de nombreuses et diverses catégories (travaux maritimes…).

Cause de l'accident

Les accidents sont liés à une mauvaise anticipation du chantier, une mauvaise prévention, une mauvaise gestion d'un accident. Attention notamment lors des opérations de mise à l'eau et d'extraction de l'eau des plongeurs.

Gravité

Parmi les accidents recensés dans le domaine des travaux subaquatiques, on trouve plusieurs cas de décès. Une moyenne de 1 décès par an a été recensée entre 2009 et 2011 ce qui est très important sur une population de 400 ETP.

Les décès sont liés au chantier, à des problèmes de consignation (ouvrir les vannes alors qu'un plongeur est à l'intérieur). Les aspirations ont notamment causé des accidents mortels, la chaleur également (cas d'une plongée en centrale nucléaire).

Prise en charge de l'accident

Pour la prise en charge immédiate de l'accidenté, les secours sur site doivent disposer d'une mallette de chantier avec de l'oxygène et de quoi faire les premiers gestes de secours. Sur le chantier, c'est le COH qui est chargé de déclencher les secours, à partir de ce moment là, la gestion de l'accident passe sous la responsabilité des secours. Le 2ème maillon de la chaîne de secours est le SAMU.

L'entreprise a tendance à gérer ses accidents directement sur site, suivant ses propres schémas de secours, alors que les travailleurs n'ont pas suffisamment d'entrainement à la manipulation des matériels de secours et qu'un accident de plongée devrait être pris en charge en relation avec un centre hyperbare (par téléphone). La formation à la SST hyperbare de tout le personnel permettrait de régler la question de l'habilitation du personnel à prodiguer les premiers secours.

D'après la réglementation, tout chantier hyperbare doit prévenir en amont le centre hyperbare le plus proche (un caisson doit être disponible à moins de 2 heures du lieu du chantier) que des travaux ont lieu dans la région, et mettre en place un plan de secours. Mais cette démarche ne prend pas en compte le fait que les secours appelés en cas d'accident sont le SAMU, qui a ses propres réglementations indépendamment de la médecine hyperbare. De ce fait, 99% des SAMU emmènent au premier hôpital qui reçoit et qui ne disposera pas nécessairement d'un caisson de décompression alors qu'un accidenté hyperbare doit être pris en charge dans un caisson dans les 3 heures maximum suivant l'accident. Il n'y a pas de coordination des moyens autour de l'accidenté hyperbare, pas de coordination non plus entre le médecin de l'entreprise et la médecine hyperbare.

Certaines entreprises, lorsqu'elles ont des chantiers particuliers (en montagne notamment), peuvent disposer d'un caisson de chantier sur site. Attention à la différence entre caisson thérapeutique, manipulé par un médecin, et caisson de chantier, manipulé par un COH en relation avec un médecin du centre hyperbare. Le médecin hyperbare donne son accord par téléphone au COH pour mettre l'accidenté dans le caisson et peut également donner des directives concernant le traitement de l'accidenté (durée, profondeur, quantité d'oxygène…).

Suites de l'accident

Après tout type d'accident, le travailleur est déclaré temporairement inapte, jusqu'à la réalisation d'un bilan médical obligatoire avant la reprise du travail (médecin hyperbare et/ou médecin du travail). Le médecin donne un avis sur l'existence d'un risque médical inhérent au plongeur mis en cause dans l'accident.

En cas d'accident de gravité élevée, il peut être nécessaire de mettre en place un suivi médical spécifique voire des contre-indications spécifiques (procédure normée).

Lorsqu'une inaptitude est prononcée, elle est souvent définitive puisque dans 90% des cas d'inaptitude, les causes sont inhérentes à la personne et risquent de causer un nouvel accident.

L'ajustement du poste est quasiment impossible puisque le poste n'est pas déterminé par l'entreprise qui ne maitrise par ailleurs pas l'ensemble des conditions d'une plongée (courant, température…).

En revanche, un reclassement devrait être possible suivant les qualifications du travailleur, notamment une reprise de leur ancienne profession (d'où l'intérêt de mettre en place un système de reconnaissance des compétences).

PRECONISATIONS POUR AMELIORER LA SECURITE DES TRAVAILLEURS EN MILIEU HYPERBARE AVEC CE TYPE DE MELANGE

- La formation est un point clé.

- La récente mise à jour de la réglementation, mêmes si des corrections et ajustements sont encore nécessaires, a permis d'enclencher une prise de conscience et des discussions de l'ensemble des acteurs concernés, ce qui est très positif.

- Attention à ne pas dissocier les accidents de travail des accidents de plongée pour préserver le niveau de sécurité requis pour les activités de plongée.

Sécurité civile (sapeurs-pompiers) - Centre National de plongée, Ecole d'application de sécurité civile (ECASC)

M. Jean-Jacques GRENAUD - Officier supérieur de Sapeurs-Pompiers Professionnels, Chef du Centre National de Plongée, Référent National Subaquatique Sécurité Civile

Date de l'audition : 27/11/2014

Lieu de l'audition : Marseille

L'ECASC forme tous les acteurs de la sécurité civile pour tous les niveaux d'activités avec une partie nautique.

DEFINITION DE LA POPULATION PROFESSIONNELLE

La plongée sapeurs-pompiers est « vieille » et n'est réellement structurée de manière professionnelle que depuis 10 ans seulement. Avant, les pratiques étaient plus proche des techniques de plongée loisir et les effectifs plus importants. Aujourd'hui, la volonté est plutôt à la professionnalisation des effectifs : moins de personnel, mais du personnel plus qualifié.

Effectifs par mention :

2750 plongeurs sapeurs-pompiers de la Mention B sur le territoire national parmi lesquels

- **Mention B, classe 2** : 1700 plongeurs scaphandrier autonome léger (SAL) qui interviennent de 0 à 40 mètres.
- **Mention B, classe 3** : environ 1000 plongeurs qui interviennent de 0 à 60 mètres.

- **Mention C** : Environ 100 personnes appartiennent à la mention C, ce sont principalement des médecins et depuis peu, des infirmiers. La filière « infirmiers » n'existait pas jusqu'à récemment, elle est actuellement en phase de développement. Leurs activités principales sont de vérifier/délivrer des aptitudes médicales (médecins) et depuis peu, assurer un soutien sanitaire (infirmiers). Il n'y a pas de manipulation des caissons par ces personnels car les sapeurs-pompiers ne disposent d'aucun caisson sur site (le seul caisson mobile multiplace se trouve à l'ECASC), ni aucun caisson dans les unités opérationnelles. La chaîne de secours s'appuie sur les caissons hospitaliers avec mise en place de plans de secours.

Parmi la population de plongeurs pompiers, environ 20 plongeurs appartiennent au SSF (secours spéléo français). Le SSF est une association agréée de sécurité civile avec un plan de secours national qui peut être mis en œuvre au niveau de chaque département.

Les pompiers sont habilités à intervenir en plongée sous plafonds (épaves, parking souterrains immergés, grottes…) et des agents spécifiques sont qualifiés pour ce type de plongées selon 2 niveaux : le niveau 1, qui correspond à une progression horizontale de 60 mètres et un niveau 2 vient d'être créé pour les départements dans lesquels la fréquentation des sites de spéléologie est importante (Aveyron, Lozère, Lot et Garonne, Pyrénées-Orientales) autorisant une progression horizontale de 200 mètres maximum. Pour des interventions de secours au-delà de 200 mètres, on fait systématiquement appel au SSF.

La population compte peu de pompiers volontaires (environ 4% de l'effectif total).

Age moyen des « travailleurs hyperbares » :

La moyenne d'âge est à 40 ans avec des extrêmes allant de 23 ans pour les plus jeunes jusqu'à 58 ans pour les plus âgés. Cette moyenne élevée s'explique par le fait que pour arriver à un haut niveau de plongée chez les sapeurs-pompiers, il est nécessaire d'avoir à son actif un nombre important de plongées et de formations.

Nb moyen d'interventions annuelles/ « travailleur hyperbare » :

Les plongeurs sapeurs-pompiers interviennent en moyenne 30 fois par an.

Nb moyen d'années de travail hyperbare / Nb moyen d'interventions totales/ « travailleur hyperbare » :

La durée d'une carrière est en évolution et tend à diminuer. Jusqu'ici elle représentait environ 30 années de plongée avec 1000 opérations sur une carrière en moyenne et à l'extrême, 6000 plongées sur ces 30 ans d'exercice. La moyenne se situe actuellement aux environs de 20 ans de carrière.

TECHNIQUES D'INTERVENTION EN CONDITIONS HYPERBARES

Plongée aux mélanges :

Chez les sapeurs-pompiers, les mélanges utilisés sont le trimix normoxique et le nitrox.

La population de sapeurs-pompiers plongeurs ayant reçu une formation à la plongée aux mélanges représente un effectif de 400 personnes pour le Nitrox et 34 personnes pour le Trimix normoxique.

Un guide des techniques professionnelles définit l'ensemble des opérations que les sapeurs pompiers sont amenés à conduire dans le domaine concernant les interventions en milieu aquatique et ou hyperbare, tant sur le plan opérationnel (procédures de plongée (durée/profondeur max) que sur le plan de la formation et des exercices.

- **NITROX** :

Aucun accident recensé chez les sapeurs-pompiers lié son utilisation.

Pas d'utilisation en mélange fond. JJ Grenaud n'est pas favorable à la plongée Nitrox de fond car il considère que l'utilisation d'un biberon de secours en autonome (petite bouteille de mélange) revêt un caractère dangereux pour les sapeurs-pompiers en mission de sauvetage, puisque cela les amène à respirer des mélanges suroxygénés à des profondeurs importantes et augmente les risques d'hyperoxie.

2 options de tables de décompression sont possibles :

- Si la décompression est faite à l'oxygène pur (100%), utilisation systématique de la table air-oxy 6 mètres
- Si la décompression est faite à l'aide d'un mélange suroxygéné (nitrox à 70% d'O2) (utilisation plus rare car plus contraignante), la table air-oxy 6 mètres ne correspond plus, c'est la Table MT air standard qui est utilisée avec comme sécurité, la réalisation des paliers à l'air au mélange suroxygéné.

Il serait néanmoins possible de développer l'utilisation du Nitrox en décompression et en plongée traditionnelle. C'est une pratique intéressante notamment pour les plongées dans les eaux intérieures, les lacs et en altitude.

- **TRIMIX NOMOXIQUE** :

Le trimix est utilisé uniquement en formation à l'ECASC.

Avantages de son utilisation :

C'est un mélange qui n'impose pas d'équipement spécifique, uniquement un biberon de secours en plus qui est utilisée pour le mélange suroxygéné à partir de 12 mètres, prévue dans le run-time. Arrivée à 6 mètres, parachute de palier et bouée dérivante (car passage à l'O2 pur à 6 mètres).

A 60 mètres, profondeur équivalente air à 30 mètres, donc la lucidité est bien meilleure pour travailler. Mais utilisation préconisée par JJG à partir de 50 mètres.

Les plongeurs du travail sont verrouillés à une profondeur maximale de 50 mètres, mais qui va pouvoir porter secours aux accidents de plongée qui ont lieu à 60 mètres, notamment les plongeurs loisirs dont les profondeurs sont définies par le code du sport. Les sapeurs-pompiers ont indiqué qu'ils formeraient leurs personnels classe 3 à la plongée à 60 mètres pour intervenir sur ce type de sauvetage.

Son utilisation serait à intéressante à développer par zones avec une formation ciblée de petites équipes (unité de 15 personnes) – le mélange hélium et la formation (+ actualisation des connaissances) coûtent chers, alors que l'occurrence d'utilisation est faible, d'où la nécessité d'une formation ciblée d'un nombre retreint de personnes. La durée d'immersion envisagée avec ce type de mélange reste inférieure à 3 heures puisque les plongées des sapeurs-pompiers ne dépassent jamais 3 heures.

- **OXYGENE** :

La décompression à l'oxygène n'est pas imposée pour l'instant mais dès la parution de l'arrêté d'application du décret de 2011 concernant les sapeurs-pompiers, elle sera obligatoire dans la zone 50-60 mètres et recommandée dans la zone 40-50 mètres.

Pas d'utilisation d'oxygène en mélange fond, pour le moment, plutôt du trimix normoxique avec décompression au nitrox (70%/30% à partir de 12 mètres).

Type de tables de décompression

Pour le nitrox : tables MT Air standard (en mélange fond) ou air-oxy 6 mètres (en décompression)

Pour le trimix normoxique : utilisation des standards IANTD

Maintenance du matériel

L'inspection visuelle des matériels est réalisée au sein de l'école (présence de personnes qualifiées) mais dans toutes les autres structures, elle est sous-traitée. Les autres opérations de maintenance sont réalisées via des conventions mises en place avec les fournisseurs.

Périodicité des contrôles :

- Inspections visuelle annuelle
- Requalification des blocs tous les 2 ans
- Révision annuelle des détendeurs

Un questionnement est en cours sur le contrôle des gilets stabilisateurs et les vêtements étanches qui sont pour le moment sous-traités. Des fiches types d'inspection visuelle sur ces équipements sont en train d'être mises au point car les magasins ne sont au final pas plus qualifiés que les

sapeurs-pompiers pour faire ce type de vérification. L'objectif étant de faire des économies et d'améliorer la sécurité. Un futur module de formation à ces vérifications devrait être enseigné à tous les cadres.

Prophylaxie

Des mesures générales de prophylaxie sont mises en place progressivement par le biais de campagnes de sensibilisation des personnels, mais dans la pratique, peu réalisées. Une marge de progression importante demeure sur ce plan.

En revanche, le matériel est individualisé, le personnel très bien suivi médicalement et systématiquement vacciné contre la leptospirose.

Il faudrait équiper les unités avec un bac de désinfectant et définir un protocole précis de désinfection des matériels. Certaines circonstances devraient imposer des protocoles de désinfection à mettre en œuvre, par exemple après une plongée dans des eaux stagnantes. Il ne semble pas pertinent de mettre en place une désinfection systématique, après chaque plongée qui apparaitrait comme contraignante et n'inciterait pas les plongeurs à suivre ces préconisations.

Description de l'activité : équipe minimale sur le site pour encadrer les interventions

→ Organisation d'une plongée trimix normoxique : même fonctionnement qu'une plongée standard ?

En situation normale, l'organisation d'une intervention de plongée classique ou « engagée » (surface fond libre ou trimix) se fait en présence des fonctions suivantes :

- 1 directeur de plongée (DP) en surface, qui doit être au moins du même niveau que les plongeurs (au moins qualifié trimix normoxique s'il s'agit du mélange utilisé par l'équipe fond par exemple);
- 1 équipe sécurité ;
- 1 équipe fond (les plongées doivent se faire systématiquement en binôme, donc au minimum 2 plongeurs sont à l'eau).

Un soutien sanitaire est mis en place pour toutes les plongées dites « engagées » : plongées profondes (trimix normoxique), plongées sous plafond, plongées en altitude, plongées en eaux froides ou recherches longues durées… En termes de soutien sanitaire, la présence de plongeurs formés pour la plongée au trimix est requise.

En situation dégradée (en plongée standard), la présence de 3 personnes au minimum est requise sur une intervention : 2 plongeurs à l'eau et un plongeur en surface qui peut faire office de plongeur de secours.

En amont des chantiers :

Une phase d'analyse hors plongée est obligatoire. C'est le rôle du conseiller à la prévention hyperbare (1 CPH par département). Chaque département dispose d'un schéma départemental d'analyse des risques qui permet d'identifier toutes les situations à risques (présence de barrages, d'écluses, de lac en altitude…). A partir de cela sont établis des plans prévisionnels de prévention et pour chaque cas/site analysé, un plan de secours est élaboré (chaîne de secours : zone d'intervention, caisson, vecteurs).

Avant l'intervention des pompiers, une analyse doit déterminer si l'on est en situation normale ou dégradée. 24 modes dégradés ont été initialement prévus et enseignés aux pompiers pouvant être amenés à intervenir.

Problème de matériel à signaler :

Les nouvelles combinaisons de plongée sont beaucoup plus étroites qu'avant et posent un problème de squeeze, les plongeurs n'arrivent plus à décompresser facilement des oreilles et des accidents peuvent arriver, surtout parmi les plongeurs novices.

Formation (personnes et matériel)

Actuellement, avant de pouvoir enseigner, un formateur Nitrox ou trimix doit suivre un parcours spécifique : 1) détenteur du diplôme en tant qu'équipier nitrox ou trimix ; 2) détenteur d'un diplôme d'encadrement de base, mais doit en plus participer à l'encadrement en tant qu'aide-moniteur pour être reconnu comme formateur nitrox ou trimix.

Un dispositif d'équivalence est à l'étude qui comprendrait un enseignement passerelle complémentaire à la formation sécurité civile de base, spécifique à l'utilisation de ces mélanges (apprentissage de l'application de tables différentes…).

Un encadrant effectue un recyclage obligatoire tous les 4 ans. Il revient se reformer 1 mois tous les 4 ans et apporte son retour d'expérience (permet d'avoir une remontée d'informations importante des activités sur tout le territoire).

Un système de formation et de maintien des acquis est mis en place pour l'ensemble des plongeurs de France. Chaque agent suit des formations de réactualisation des connaissances suivant les compétences qu'il a à la base.

Mode de fabrication et modalités d'analyse des gaz :

Livraison des gaz (Nitrox, trimix) prêts à l'emploi. Pas de fabrication des gaz.

- contrôle gaz systématiques : analyseurs de gaz, vérification des étiquetages
- traçabilité : des registres spécifiques d'analyse de gaz pour le nitrox et le trimix

Type de matériel/pratique(s) mis(es) en œuvre

APNEE :

Les sapeurs-pompiers plongeurs ont fait beaucoup d'apnée. D'une part, l'apnée est intégrée dans les épreuves du cursus de formation (profondeur de 10 mètres) et d'autre part, cette pratique présente un intérêt opérationnel dans la mesure où les sauveteurs aquatiques la mette en œuvre régulièrement dans 3 mètres d'eau, pour faire des recherches en attendant l'arrivée des secours et elle peut également s'avérer utile dans le cas de sauvetages à une profondeur de 10 mètres. A noter que ces pratiques ne sont pas concernées par le décret qui ne s'applique qu'à partir de 10 mètres de profondeur.

Elle peut être à l'origine d'accidents barotraumatiques en lien avec un mauvais équilibrage des oreilles. Un cas de syncope hypoxique a été recensé. C'est pour cela que c'est une activité qui doit être associée à la mise en place d'échauffement et d'une surveillance particulière. Il est par ailleurs interdit de plonger en apnée après toute plongée bouteille (défini dans le code de la plongée).

AVIS SUR LES RECYCLEURS :

Jusqu'ici cette technique n'était pas envisagée chez les sapeurs-pompiers. Son intérêt ne s'était pas fait ressentir.

- D'une part car l'autonomie importante qu'offre l'appareil n'intéresse pas particulièrement les pompiers qui font majoritairement des plongées planifiées avec des durées d'intervention qui ne nécessitent pas ce niveau d'autonomie ;

- d'autre part, la rigueur nécessaire pour entretenir l'appareil et sa technicité sont a priori difficilement compatibles avec l'actuelle mise aux normes européennes en termes de durées de travail des agents qui tend notamment à diminuer les temps de formation des personnels.

L'intérêt d'utiliser le recycleur dépend des profils de plongées.

La volonté actuelle n'est donc pas à la banalisation de l'emploi du recycleur chez tous les plongeurs sapeurs-pompiers, mais plutôt de limiter la mise en œuvre de ces pratiques et matériels plus techniques, notamment l'emploi de trimix normoxique voire du recycleur, à certaines équipes restreintes par zones (9 zones sur le territoire national : 7 zones en métropole + 1 zone sur les DOM-TOM + 1 sur l'océan indien). L'idée étant de constituer par zone, une équipe qui mettrait en œuvre ces techniques plus pointues. La zone de plongée resterait limitée à 60 mètres de profondeur.

Mathieu Coulange demande si le problème de coût du trimix pourrait inciter les plongeurs pompiers à plutôt développer l'utilisation des recycleurs.

Jusqu'à présent, l'intérêt d'utiliser des recycleurs ne s'est pas réellement présenté. Il y a pourtant un historique important de l'utilisation de ce type d'appareils chez les sapeurs-pompiers avec les équipes de reconnaissance longue durée dans les tunnels (à sec) qui sont par ailleurs, souvent, des sapeurs-pompiers plongeurs. Mais pour les activités de secours, il n'est pas nécessaire de bénéficier d'un temps d'intervention très long.

EFFETS SANITAIRES/ACCIDENTOLOGIE

Actuellement, plus aucun incident technique, ni matériel n'est recensé, uniquement des problèmes de facteurs humains et au-delà, de comportements humains :

- non respect des mesures de sécurité
- défaut d'analyse et d'organisation

Service de santé des armées (SSA)

M. Michel HUGON – Médecin en chef, Chef du service de médecine hyperbare de l'Hôpital d'Instruction des armées de Sainte-Anne ; Représentant le Service de santé des armées (SSA) – Hôpital Sainte-Anne et MedSubHyp (Société de physiologie et de médecine subaquatiques et hyperbares de langue française)

Date de l'audition : 18/11/2013

Lieu de l'audition : Toulon

Il y a 3 centres hyperbares du SSA en France : Toulon (objet de l'audition), Paris et Metz

- A Paris (hôpital du Val de Grâce), les personnels intervenant dans le service de médecine hyperbare (infirmiers…) interviennent également dans d'autres services du Val de Grâce (réanimation et autres…). Seul le responsable du service, Pascal Constantin est affecté à 100% de son temps au caisson hyperbare.

- A Metz, l'activité est quasi nulle car le centre hyperbare est hors du circuit ARS local et les urgences sont évacuées sur le Luxembourg.

DEFINITION DE LA POPULATION PROFESSIONNELLE

1) Effectifs tous métiers confondus :

La population professionnelle du SSA comprend le personnel hospitalier et le personnel opérationnel (dans les forces, peu d'activités thérapeutiques). Les expositions hyperbares de ces 2 types de personnels ne sont pas les mêmes. Certains sont amenés à plonger professionnellement en eau (SCUBA et mélanges), en annexe à leur cœur de métier.

2) Métiers représentés et répartition des effectifs :

Personnel hospitalier :

- **Mention C**, classe 2 : plongent uniquement en air comprimé

Opérationnels :

- **Mention C**, classe 2 : IPH infirmiers qui sont également plongeurs à l'air voire aux mélanges (partie annexe de leur métier)

3) Description des métiers et activités représentés :

Le SSA tient une comptabilité précise des expositions de tout le personnel hyperbare. Michel Hugon/Christophe Peny nous fournira des données sur le nombre d'expositions par individu en moyenne par mois ou par année, en termes de durée et de profondeur.

Concernant le personnel de l'hôpital Sainte-Anne:

- 5 infirmiers sont affectés au service de médecine hyperbare
- 2 mécaniciens matériels sont chargés de l'entretien et de la mise en œuvre du caisson. Ils peuvent intervenir en milieu hyperbare en cas de problème technique ou en cas de table particulière. En cas de nécessité d'économiser le personnel soignant, ils peuvent être

amenés à faire un aller retour à 18 mètres à l'air pour changer le gaz (par exemple dans le cas d'une table COMEX 30 à l'héliox, pour remplacer l'oxygène).

Ces personnels sont donc aptes à l'hyperbarie et bénéficient d'une surveillance spéciale en médecine préventive.

<u>Concernant le personnel opérationnel</u>:

Les plongées durent 25 minutes à 50 mètres de fond avec des paliers de décompression à l'oxygène. La durée totale ne dépasse pas les 90 minutes de plongée pour des profondeurs importantes (pour les durées de décompressions : une à 10 minutes, 3 à 9 minutes, 8 à 6 minutes et 20 à 3 minutes).

Il est possible de faire des plongées de 1h20 à 2heures, mais dans 20 mètres d'eau.

4) Profil des populations de plongeurs militaires :

Pour donner un ordre d'idée, les infirmiers travaillent sur ces postes en moyenne 8 ans, avec une fourchette basse à 5 ans et un maximum à 15 ans.

<u>TECHNIQUES D'INTERVENTION EN CONDITIONS HYPERBARES</u>

1) <u>Techniques utilisées et effectifs concernés</u>

Caisson hospitalier pour air comprimé + mélange ; ***(personnel hospitalier + opérationnel)***

SCUBA + mélange ***(personnel opérationnel)***

Narguilé + mélange ***(personnel opérationnel)***

Recycleur ***(personnel opérationnel)***

2) <u>Utilisation du recycleur</u>

Gestion de la chaux sodée

La chaux existe sous 2 formes :

- la chaux à charger soi-même dans l'appareil (opérateur dépendante)

- la chaux en cartouches (canisters), prête à l'emploi, à mettre en place directement, elle est standardisée

Actuellement, le renouvellement de la chaux sodée au sein du SSA est manuel et se fait toutes les 2h en utilisation discontinue (durée cumulée) ou toutes les 3h pour une utilisation continue.

Actuellement au sein du SSA, un travail de comparaison de ces 2 façons de procéder est en cours avant d'envisager de changer la politique de renouvellement. Suivant la qualité de chaux utilisée et le travail accompli par l'individu en plongée, on relève un écart important de durée d'utilisation de la chaux (d'un facteur de 0 à 3).

En cas d'accident recycleur, les premiers éléments investigués sont la chaux sodée et le fonctionnement de l'appareil. La chaux n'a pour le moment jamais été mise en cause dans la survenue d'un accident si ce n'est qu'elle est parfois trempée, mais cela témoigne d'une étanchéité inefficace, pas d'un défaut de la chaux en elle même. La chaux est parfois mal tassée, créant des chemins préférentiels dans au sein de la cartouche, et impliquant que toute la cartouche n'est pas efficace.

Mathieu Coulange se demande comment améliorer l'expertise sur la chaux, le problème étant que c'est l'opérateur qui doit remplir sa chaux, donc quoi qu'il en soit c'est une opération dépendante de l'opérateur (facteur humain). Potentiellement par l'utilisation de la chaux en cartouches : standardisée, elle n'a plus qu'à être mise en place, moyennant un léger surcoût (15 à 20% plus cher).

Il existe des différences notables entre les chaux suivant le fournisseur (conditions de stockage, humidité, température…). Tous les 5 ans, l'armée refait un appel d'offre et re-teste toutes les chaux pour sélectionner les chaux qu'elle souhaite utiliser.

D'après la norme, les chaux doivent être validées (standardisation réalisée par le LASEM : Christophe Peny doit fournir des documents). Il existe des normes au temps que doivent respecter les chaux sodées (vérifiées par le LASEM). La chaux sodée ne doit pas dépasser 5 hPa, ce qui correspond à des plongées de 3 heures à 24 mètres de profondeur avec une PPCO2 qui reste en dessous de 0,5%.

3) Description de l'activité/du type de chantier

Equipe minimale sur un caisson hyperbare <u>hospitalier</u> pour une séance d'oxygénothérapie hyperbare : appartient au SSA qui en est responsable

- 1 manipulateur (de préférence apte à l'intervention hyperbare pour d'éventuelles actions techniques à l'intérieur de caisson en cours de traitement)
- 1 infirmier (obligatoirement apte à l'intervention hyperbare)
- 1 médecin (obligatoirement apte à l'intervention hyperbare)

Equipe minimale sur un caisson hyperbare <u>mobile</u> : appartient aux forces armées

- 1 directeur de plongée : prend la fonction de chef opérateur hyperbare responsable de la mise en œuvre du traitement (peut manipuler le caisson, mais ce n'est pas son rôle). En l'absence du médecin, il a la responsabilité du traitement.
- 1 manipulateur
- +/- 1 médecin : responsable du traitement, donne les directives thérapeutiques
- 1 infirmier : administre le traitement à l'intérieur du caisson
- 1 secrétaire : note tout

4) Conditions d'utilisation

Caisson hospitalier

La mise en pression du caisson se fait systématiquement avec un infirmier (dès que les patients sont branchés, l'infirmier ressort). L'accompagnement dépend de l'état clinique du patient. Un patient intubé et ventilé sera accompagné pendant toute la durée de plongée.

Lors d'un accident de décompression (ADD), la mise en pression se fait nécessairement en présence d'un médecin pour refaire des examens une fois au fond.

L'accompagnateur reste toujours à l'air (avec possibilité de paliers à l'O2 pour accélérer la remontée). Ce sont les tables MN90 (et pas les MT) qui sont appliquées par tout le personnel. Les expositions se font dans le respect des tables la plupart du temps. La décompression à l'O2 n'est pas systématique.

Mathieu Coulange s'interroge sur la conformité réglementaire liée à l'utilisation des tables MN90.

C'est une table utilisée historiquement par les militaires et compte tenu des dispositions législatives particulières dont bénéficie l'armée, cette utilisation ne pose pas de problème quand il s'agit du personnel militaire. La présence dans le SSA d'un infirmer civil (ancien militaire), soulevait la question d'un passage sur des tables MT, mais pour des questions de sécurité, il était plus judicieux de maintenir l'utilisation des MN 90, d'autant qu'elle ne sont mises en cause dans aucun incident.

Au sein du SSA, pas de décompression à l'O2 pour les infirmiers. Cette procédure, validée par l'armée, permet aux infirmiers d'avoir une liberté d'action plus importante dans le caisson. Ils font toutes leurs opérations à l'air (Pression maximale de 4 ATA – remontée par paliers de 30 min au départ et de 60 min à la fin – 6 heures en tout).

- <u>Profondeur maximale d'utilisation</u> : 6 ATA (une seule chambre de compression a la capacité de descendre à ce niveau).

Des tables thérapeutiques persistent encore pour de telles profondeurs, mais elles ne sont dans la pratique pas mises en œuvre et devraient être évitées. Le fait de descendre à 6 ATA correspond à une profondeur de 50 mètres et entraine une prise de risque pour le personnel qui s'immerge avec le patient, une prise de risque pour le patient lui-même et un risque lié à l'absence d'un accompagnant dans le caisson avec le patient.

En revanche, il est nécessaire pour l'armée de conserver une profondeur maximale à 5 ATA à titre préventif. En effet, certains protocoles de recompression ternaires de secours nécessitent une plongée à 40 mètres, il n'est donc pas possible de déclasser les caissons à 5 ATA. Il est cependant possible pour la thérapeutique, de limiter à 4 ATA.

- <u>Fréquence d'utilisation</u> : la moyenne est de 3 mises en pression par jour à raison de 8 patients maximum par descente. Globalement cela représente entre 10 à 20 personnes traitées quotidiennement.

Durée d'intervention du personnel :

Le décret limite à 2 par jour pour le personnel le nombre d'interventions en milieu hyperbare par 24 heures (voire 3 interventions en cas d'urgence, sur décision et sous la responsabilité du médecin). Avec une durée maximum cumulée de 3h maximum par 24h en incursion.

Incidents lors des recompressions aux mélanges sur des tables profondes :

Aucun incident recensé chez les patients ayant subi ce traitement (en dehors de leurs troubles initiaux).

Incidents au moment des traitements en dehors de la plongée profonde :

Certains patients qui se présentent sont hyper-angoissés, quelques cas d'hypoglycémies qui se sont déclenchées dans le caisson, mais pas de problèmes liés directement au traitement (pas de troubles cardio-vasculaires ou hyperoxiques…). En moyenne les plongées sont faites à 15 mètres (OHB 15) et durent au total 90 minutes (3 cycles).

Accidents notables :

Le plus souvent, ce sont les accidents qui se déclarent à retardement qui sont les plus dangereux.

5) Maintenance du matériel

C'est la cellule biomédicale qui gère la maintenance.

- La maintenance du caisson est en contrat avec la COMEX (le caisson est COMEX, la chaudronnerie, mano, vannes…) sauf pour le respirateur qui est auxiliaire
- La partie compresseur est gérée par les mécaniciens de l'hôpital : contrôle de l'air
- Gaz : livraison de bouteilles par Air Liquide (Nitrox/Heliox) et oxygène pur livré par la source oxygène de l'hôpital
- Sécurité incendie : ce sont les mécaniciens qui font les balancements qui gèrent

Parmi les chambres de décompression, un enregistrement automatique des paramètres de plongée a lieu pour une des chambres qui est complètement automatisée, l'autre chambre est manuelle, pour les urgences.

Modalités - traçabilité – Prophylaxie

Microbiologie

- Surveillance microbiologique du caisson (parois, air…)
- Désinfection sommaire quotidienne
- Désinfection complète hebdomadaire
- Désinfection particulière si le patient est infecté

La désinfection du caisson est faite par contact via un appareil spécifique (utilisé pour la désinfection des blocs opératoires). La désinfection sera faite une fois par mois voire plus suivant le infections particulières que peuvent présenter les patients traités dans le caisson.

Tout le circuit utilisable par le patient est jetable et individuel (masques, tuyaux, cagoules…).

Problème de matériel à signaler ?

- Difficultés d'utilisation du ventilateur du caisson hyperbare.

6) Formation (personnes et matériel)

Le personnel militaire est formé directement à l'école du Val de Grâce qui dispose d'une certification du Ministère du travail pour former les soignants (militaires uniquement) de la mention C, classe 2.

Les infirmiers sécurité de la plongée, mention hyperbare (ISP-H): Mention C, classe 2.

- Durée : 5 semaines
- Contenu : théorie sur la physiologie de la plongée et pratique à l'hôpital et à l'école de plongée quant à la manipulation d'un caisson de plongée sanctionnées par un examen.

La formation est beaucoup plus lourde que celle enseignée à l'INPP (dure seulement 15 jours). En effet, les profils d'activités des infirmiers seront divers à la sortie. Certains exerceront à l'hôpital sous la coupe d'un médecin tandis que d'autres évolueront seuls sur un bateau (cet isolement est à prendre en compte car sur le plan médical, ils seront seuls à gérer l'accident dans le caisson).

Les médecins : Mention C, classe 2

- Prérequis : le minimum requis est le certificat de médecine appliquée à la plongée sous-marine (CMAPSM), ces médecins sont déjà plongeurs militaires de catégorie 1 (sortent d'une école – plongent à l'air à 35-40 mètres).
- Durée et contenu : théorie sur la physiologie de la plongée (15 jours) et pratique (stage de 3 semaines au centre hyperbare) sanctionnées par un examen.

<u>Les infirmiers plongeurs hyperbaristes (IPH)</u> : Mention C, classe 2

- Contenu : Infirmiers du SSA, et plongeurs de bord, ils reçoivent une formation de plongée (comme le médecin plongeur de bord) et une formation spécifique complémentaire sur un caisson (environ 1 mois et demi). Ils ont une mention « manipulateur caisson » que n'ont pas les ISP-H. Dans la marine, cette mention est obligatoire pour pouvoir manipuler un caisson.
- Objectifs : Ils deviennent experts des caissons via une formation continue améliorée. Leur plus-value est essentiellement technique.

7) Remise à niveau des connaissances sur l'utilisation des matériels (entretien, maintenance, réparation, etc.)

→***Utilisation des matériels (entretien, maintenance, réparation, etc.) :***

Une journée de formation continue par an est organisée pour les médecins et les infirmiers et une réunion par mois dans le service de médecine hyperbare pour discuter et échanger les retours d'expériences sur les patients, les dossiers.

Activité minimum requise pour la justification des qualifications du personnel, infirmier notamment :

→***Connaissance du matériel*** :

- Dès qu'une opération de plongée nécessite la présence d'un caisson, les infirmiers sont appelés à manœuvrer le caisson, assurant une manipulation régulière du matériel.
- Mise en place d'un tableau d'entrainement pour les infirmiers (document à fournir par Christophe Peny). Concernant l'entrainement du 1er niveau infirmier classe 2, mention C (ISP-H), ne concerne pas la manipulation du caisson (séjour en hyperbarie).

Une spécificité de l'hôpital Sainte-Anne concerne la mise en place d'un tableau d'entrainement pour les opérateurs caissons de l'équipe d'astreinte (en cas de problème, les infirmiers peuvent être amenés à manipuler les caissons).

→***Gestes médicaux*** :

- Les médecins participent aux astreintes médicales de l'hôpital.
- Les infirmiers vont régulièrement faire des gardes aux urgences (les infirmiers en caisson sont mobilisés une fois par mois en service de réanimation)

→***Spécificité de Sainte-Anne : formation des opérateurs caissons***

- Mise en place d'un programme pédagogique pour former les opérateurs sur les caissons sur lesquels ils travaillent. En effet, il n'existe pas de diplôme national d'opérateurs. L'hôpital a donc mis en place une formation et un entraînement de tous les opérateurs sur les caissons au sein de l'établissement. Ces personnels ne suivent pas les stages d'opérateurs hyperbares de l'INPP.

<u>NATURE DES GAZ UTILISES</u>

OXYGENE

AIR

NITROX

HELIOX

Choix des gaz :

- L'emploi du 50% d'oxygène a été étendu là où initialement était utilisé du 40% ;
- Politique Nitrox pour les plongeurs d'arme ;
- Les plongeurs de bord restent quant à eux sur une politique Air-35 mètres. Une exception est faite pour certains plongeurs instructeurs amenés à faire des allers retours (yo-yo) et qui sont autorisés à plonger au Nitrox sur des plongées « peu » profondes de 15 à 18 mètres. La plongée au Nitrox comparativement à l'air permet à ces plongeurs, d'avoir une répercussion moindre sur la fatigue du lendemain, notamment s'ils sont amenés à faire des plongées à 30 ou 35 mètres le lendemain. Cette pratique a permis pour le moment de faire disparaitre le nombre d'accidents vestibulaires parmi les instructeurs de plongée.

Les plongées durent 40 min à 1heure, avec respiration de mélange à 40% d'oxygène permettant de descendre à une profondeur maximum de 35 mètres (PPO2 de 1,8 bar).

Type de tables utilisées pour la recompression des accidents de plongée :

Tables à l'oxygène pur (profondeur de 18 mètres) :

- B 18 (recompression en oxygène pur -avec séquences d'inhalation d'air afin de diminuer la toxicité neurologique- à la pression maximum de 2,8 ATA pendant une durée de 145 minutes)
- Cx 18

Ces tables ne sont pas strictement à 100% d'O2, un passage en air est réalisé toutes les 20 à 25 min afin de diminuer les risques de toxicité, il y a donc une petite partie d'azote rajoutée.

Tables profondes (gaz inertes, profondeur de 30 mètres) :

- Cx 30 : ces tables sont modifiées par l'armée (raccourcies) et utilisées avec de l'Héliox (recherche thérapeutique de la PPHe qui permet une élimination plus efficace des bulles d'azote). Pratiquement plus d'utilisation du Nitrox, même dans le cas d'accidents de plongée à l'air. Cette évolution est liée au fait qu'il ya a très peu d'accidents avec séquelles avec l'Héliox.

Existence d'un protocole de rattrapage à l'Héliox (table profonde) après aggravation des patients dans les 24 premières heures suite au traitement à l'oxygène pur.

Dans le cas du rattrapage, à 24h, pour certains patients, l'amélioration de l'état général semble même plus rapide avec l'Héliox qu'avec le traitement habituel.

Mode de fabrication et modalités d'analyse des gaz :

L'hôpital Sainte-Anne ne fabrique pas ses gaz, ils sont livrés par Air Liquide à la cellule biomédicale. C'est la cellule biomédicale qui gère les contrôles réguliers sur les gaz.

Le service de médecine hyperbare ne fait pas de contrôle complémentaire. Un tableau de maintenance affiche les visites des compresseurs effectuées par les mécaniciens.

EFFETS SANITAIRES RECENSES LIES A L'EXPOSITION DES TRAVAILLEURS AUX CONDITIONS HYPERBARES / ACCIDENTOLOGIE

1) Accidents rapportés

→Analyse des accidents des personnels militaires (pas uniquement du SSA) sur les 30 dernières années (depuis les années 90)

- Disparition des hyperoxies en lien avec l'apparition des recycleurs (FROGS et CRAB) et diminution des hypercapnies en lien avec une meilleure gestion du travail ventilatoire impliquant que les gens sont moins fatigués et probablement moins essoufflés.

- Un peu plus d'hypoxies au début de l'utilisation des nouveaux appareils : le matériel était neuf et par rapport aux anciens recycleurs, il y a plus de sources d'erreurs si on ne fait pas attention. Les accidents n'ont pas eu de conséquences graves en lien avec l'utilisation de sangles d'embout et de couvres-lèvres.

- ADD : moins en recycleurs depuis l'utilisation du CRAB (moins d'hypercapnies donc moins de formation de bulles d'azote). Ceci est lié notamment à une modification des tables (notamment la table à 40% d'oxygène qui était la plus accidentogène).
  Pour aller dans le sens de cette diminution observée depuis 2009 (apparition du CRAB), les paliers à l'O2 sont préconisés, les personnels sont incités à plonger aux recycleurs et de moins en moins à l'air et il faudrait limiter la plongée à l'air à 50 mètres.

  En termes de chiffres, de 2009 à 2012, le nombre d'accidents par an est passé de 32 à 25 sur une moyenne de 120 000 plongées par an et 2000 plongeurs.

- Augmentation du nombre d'accidents cardio-vasculaires d'immersion. Elle concerne notamment l'utilisation du recycleur CRAB, mais également d'autres techniques d'utilisation telle l'apnée et le circuit-ouvert.

  Quelles causes pourraient expliquer cette augmentation des OP en lien notamment avec le passage de l'utilisation des DC55 vers les CRAB ? L'hypothèse étant que le CRAB serait un « révélateur » des sensibilités sous-jacentes de certains plongeurs au fait de déclencher des OP. Il semblerait néanmoins que la contre-pression respiratoire et le positionnement des faux poumons propres au CRAB soient en partie responsables de ces recrudescences d'OP.

  Les personnels ayant déclenché des OP après utilisation des CRAB n'avaient pas nécessairement fait d'événements symptomatologiques respiratoires préalables. Il est donc difficile de tirer des conclusions. Christophe Peny cite à titre d'exemple le cas d'un infirmier qui a fait un OP lors de sa première utilisation du CRAB et qui a été déclaré définitivement inapte à la plongée avec ce matériel et celui d'un élève officier qui après avoir fait un OP au CRAB, a été déclaré apte à l'utilisation de ce matériel et n'a refait aucun accident depuis.

→Incidents à signaler dans le service de médecine hyperbare

Aucun incident à signaler depuis 2008 pour une moyenne d'environ 3000 séances par an.

- Période d'inaptitude (paresthésie) pour une personne avant 2008.

- Un accident vestibulaire à la sortie du caisson et après analyses, un shunt a été détecté chez la personne concernée.

→Accidents/symptomatologies qui se déclenchent sous l'eau, lors d'une décompression à l'oxygène

Cette situation ne s'est pas présentée avec l'utilisation des recycleurs. Des accidents graves sont néanmoins arrivés lors de plongées à l'air, aux paliers.

→Décès dans le cadre de l'utilisation de mélanges gazeux respiratoires autres que l'air

- 2 décès par noyade en 1993 : nageurs de combat (2 élèves dans conditions très particulières – un des nageurs a probablement fait une hyperoxie liée à l'hypercapnie et a entrainé son binôme dans une zone située sous une barge qui les empêchait de regagner la surface, la nuit et l'inexpérience des 2 élèves ayant contribué à la panique et à la noyade des 2 plongeurs)
- 1 mort au mélange ternaire (1 élève – en lien avec la jeunesse du plongeur et la mauvaise gestion de la plongée)
- Autres cas mais pas en lien avec l'utilisation de certains types d'appareils

Plusieurs accidents mortels auraient pu survenir par noyade suite à des hyperoxies ou hypoxies, mais le fonctionnement des plongées militaires en binôme et avec les sangles d'embout et le couvres-lèvres a permis de prévenir ce type d'accidents.

→Accidents recycleurs en plongées profondes

Le SSA ne recense pas d'accidents car les plongées profondes sont de durées très courtes.

Des accidents militaires ont été recensés en Allemagne/Angleterre pour l'utilisation de recycleurs en profondeur, mais il ne s'agit pas des mêmes conditions d'utilisation qu'en France, notamment en termes de visibilité.

Concernant la réponse à la saisine de l'INPP sur les recycleurs, il faut faire attention car cette réponse date de 2011, et que depuis, des accidents sont survenus.

2) Cause des accidents

Il s'agit d'erreurs humaines ou d'erreurs de procédures comme par exemple un mauvais contrôle du matériel avant la mise à l'eau. Le matériel n'est jamais directement mis en cause. Par ailleurs, les personnels sont formés à réagir face à du matériel défectueux.

Sur le recycleur, en cas de problème, un passage sur le système de secours (bail-out contenant un « mélange fond ») est possible. C'est néanmoins un fait très rare voire inexistant dans la pratique pour le moment. Les plongeurs militaires n'ont pas nécessairement développé ce réflexe car sur le DC55, le système de secours n'existait pas alors qu'il existe sur le CRAB.

Sur l'année 2012, dans les ADD, aucune erreur de procédure n'est mise en cause, ni de préparation physique insuffisante.

Facteurs favorisants

- L'environnement de plongée (mer calme, courant…) peut jouer un rôle dans les accidents.

- Une surconsommation de mélange respiratoire peut être liée à l'effort. Néanmoins, les façons de ventiler sont différentes en fonction des individus et donc difficilement prévisibles.

- Il y a peu de plongées successives, donc cela n'est pas un facteur favorisant notable.

Globalement, le nombre d'accidents de plongée est en légère baisse, mais cela s'explique en partie par le fait que la population de plongeurs baisse également. Néanmoins, parallèlement, le système de déclaration des accidents militaires au sein des différentes armées est plus performant qu'auparavant.

Le nombre d'accidents parmi les gendarmes est en hausse. Les plongeurs gendarmes représentent pourtant un effectif de seulement 300 plongeurs qui ont des profils de plongées très différents, puisque pour la majorité d'entre eux plongent dans 10 à 15 mètres d'eau. Le nombre d'accidents recensés est statistiquement élevé avec 5 accidents remontés en 2012 et 2013. Ils ne font pas de décompression à l'oxygène mais font pour certains des plongées entre 40 et 60 mètres sans que cela soit une nécessité au niveau opérationnel (entrainement de certains pools de plongeurs). Le centre de formation du personnel de la gendarmerie (ING) est également pourvoyeur d'accidents, 2 par an en moyenne.

3) Prise en charge des accidents

Dans la Marine, la plupart du temps, le caisson, les infirmiers et médecins sont sur zone. De ce fait, les accidents sont pris très tôt en charge (dans les 15 min en moyenne). La recompression est effectuée dans les 5 à 15 min. S'il n'y a pas de caisson sur zone, l'individu est pris en charge dans les 5 à 10 minutes après déclaration de l'accident.

Par mesure de prévention, sachant que 75 à 80 % des accidents surviennent au cours de la première heure suivant la plongée, tout plongeur doit rester à proximité (moins de 5-10 minutes) du caisson dans l'heure qui suit une plongée.

Dans les 24 premières heures suivant une plongée profonde, les plongeurs ont une série de préconisations à respecter : ne pas faire d'activité physique, ne pas prendre l'avion, ne pas aller à la montagne, ne pas faire de course de vélo et ils ont à dispositions le numéro de téléphone du caisson le plus proche.

Pour les évacuations héliportées, les plongeurs sauveteurs militaires présents dans les hélicoptères peuvent plonger jusqu'à maximum 15 mètres à l'air pour récupérer les plongeurs en difficulté. Des tables ont été calculées pour définir ces profondeurs et pourraient être extrapolées à l'utilisation de mélanges et recycleurs (profondeur de 24 mètres envisageable, mais plus profond cela risque d'être difficile).

<u>Questions de Mathieu Coulange :</u>

- Dans le cadre d'une utilisation des recycleurs par les plongeurs scientifiques sur des plongées profondes, est-il justifié de limiter les paliers suivant la distance avec le caisson (à partir du moment où il y a des paliers, il doit y avoir un caisson à moins de 2h)

- Christophe Peny répond qu'il est difficile de se prononcer sur cette question car plus on plonge profond et longtemps, plus on risque de faire un ADD sérieux qui sera difficilement traitable, même s'il est pris en charge rapidement.

4) Gravité

Les séquelles après un accident sont plutôt rares. Si on prend l'exemple des ADD, il y a en moyenne 4 à 6 ADD par an (en incluant la plongée à l'air) avec un accident grave tous les 4 à 5 ans.

Les accidents qui surviennent avec la plongée mélanges et aux recycleurs sont plutôt des accidents biochimiques.

Christophe Peny va étudier les statistiques des 10 dernières années concernant l'utilisation des CRAB et du DC55 comparativement à la plongée à l'air pour voir quelle est l'incidence des ADD pour chaque technique respectivement et suivant le nombre de plongées.

5) Suites de l'accident

Suivi des accidents

Tout type d'accident entraine une expertise du matériel. Cette expertise s'accompagne de la rédaction d'un compte rendu militaire et d'un compte rendu médical transmis aux médecins du SSA, s'en suit un compte rendu d'analyse qui compile les informations techniques et médicales. Cette procédure permet d'avoir chaque année un bilan complet des accidents survenus dans les armées.

Après tous les types d'accidents de plongée (ADD, hypercapnie, barotraumatisme de l'oreille interne, surpression pulmonaire…), les accidentés sont revus au centre d'expertise pour délivrer les aptitudes.

La reprise d'activité se fait après passage systématique auprès du Service de médecine hyperbare (SMHP) qui déclare le personnel accidenté apte ou non.

Pour certaines séquelles telles un scotome sur le conduit auditif à l'audiogramme, les plongeurs sont autorisés à replonger. Un troublant à l'IRM peut entrainer une inaptitude provisoire ou définitive, même sans retentissement clinique (mais c'est très rare). La pathologie qui a été décelée peut entrainer dans certains cas une restriction d'aptitude (plongée autorisée uniquement aux mélanges par exemple).

Pour tous les cas particuliers d'aptitudes ou en cas de contestation, les cas sont présentés devant une commission médicale supérieure d'aptitude (1 cas tous les 3 à 4 ans). Il s'agit d'une commission mixte qui regroupe à la fois les experts médicaux et les représentants des employeurs. La discussion se fait sur des considérations médicales. Les médecins de la commission statuent sur le cadre dans lequel ils peuvent envisager une aptitude et se retournent vers l'employeur qui décide si la dérogation est acceptée ou non. C'est l'employeur qui a le dernier mot.

Inaptitudes et reclassements

Les inaptitudes définitives les plus fréquentes ne sont pas liées aux recycleurs et aux mélanges mais sont consécutives aux ADD ayant entrainés des analyses médicales poussées et la découverte d'un shunt cardiaque.

Les personnes ayant fait un ADD à l'air peuvent être déclarées définitivement inaptes à la plongée à l'air et restreintes à la plongée utilisant des recycleurs. Dans certains cas, le recycleur peut être un facteur protecteur.

Des reclassements sont parfois nécessaires (les personnels quittent la filière plongée) mais c'est extrêmement rare. Cela peut arriver consécutivement à un accident grave avec séquelles.

PRECONISATIONS POUR AMELIORER LA SECURITE DES TRAVAILLEURS EN MILIEU HYPERBARE AVEC CE TYPE DE MELANGE

1) Axes de prévention développés par les militaires pour améliorer la sécurité :

→Sur les procédures de plongée

- Limiter la plongée profonde à l'air
- Favoriser la plongée aux mélanges
- Préconiser la plongée au recycleur, au CRAB pour ce qui est de la marine.
- Favoriser l'emploi de l'oxygène aux paliers

→Sur la surveillance médicale

- Aptitude et surveillance médicale en lien avec un vieillissement de la population de plongeurs :
  - Surveiller la fonction cardiaque
    - ➢ Epreuve à l'effort systématique à partir de 40 ans
    - ➢ ECG annuel avec interprétation rigoureuse par le médecin
  - Rappel des préconisations de bonne conduite et hygiène de vie (pas d'efforts après une plongée profonde…)
  - Renforcer la surveillance tous les 4 ans (expertise médicale) et en parallèle alléger les visites annuelles.

2) Sur la question de l'utilisation professionnelle des recycleurs et de l'extension des tranches de profondeurs autorisées <u>pour les autres secteurs d'activités</u> :

Il semble difficile de mettre en place des procédures pour encadrer en toute sécurité des pratiques dites « extrêmes ».

Dans le cas de la plongée scientifique, il s'agit de plongées longues et profondes, l'objectif étant d'explorer des profondeurs importantes. Il est nécessaire de :

- Avoir du bon matériel
- Vérifier rigoureusement le matériel
- Connaissances approfondies des procédures d'utilisation du matériel
- Connaitre les risques encourus

Pour des plongées à une profondeur supérieure à 50 mètres, il vaut mieux privilégier l'utilisation des mélanges gazeux respiratoires autres que l'air plutôt que l'air comprimé, mais sans dépasser une profondeur de 90 mètres.

La plongée aux recycleurs est une plongée plus confortable, mais elle demande une préparation très importante en amont. Pour développer cette pratique dans le cadre du travail, il est nécessaire

de mettre en place une formation professionnelle sur l'utilisation des recycleurs. Qui serait chargé de dispenser cette formation ? Cette question reste en suspens. Sous réserve d'être strictement encadrée, la plongée aux recycleurs pourrait être autorisée pour certaines activités professionnelles, mais devrait être limitée à 90 mètres.

Pour des profondeurs supérieures, la question de l'autorisation de ces pratiques reste ouverte. Doit-on les autoriser ou sont-elles trop risquées ? Si cela est possible, privilégier la mise en place de systèmes automatisés ou robots pour plonger dans des conditions extrêmes. Suivant les situations, il faut se demander s'il est indispensable que l'homme risque sa vie. Quoi qu'il en soit, plus les plongées sont profondes et plus la durée de plongée doit être limitée. Se pose également la question de savoir comment ces personnes vont être formées et s'entrainer pour ce type de plongées.

M. Pascal Constantin – Médecin en chef, Responsable de l'unité fonctionnelle hyperbarie et plongée de l'Hôpital d'Instruction des Armées du Val-de-Grâce

Représentant l'organisme : Hôpital d'Instruction des Armées du Val-de-Grâce (Service de santé des armées)

Date de l'audition : 29/11/2013

Lieu de l'audition : Paris

DEFINITION DE LA POPULATION PROFESSIONNELLE

Nombre, Classe, Mention des « travailleurs hyperbares » :

La Fédération Anesthésie Réanimation Hyperbarie Urgence Bloc Opératoire (FARHUB) de l'Hôpital d'Instruction des Armées du Val-de- Grâce (HIA VDG) compte 10 travailleurs qui appartiennent à la mention C, classe 2 et fournissent un travail hyperbare au bénéfice du l'unité fonctionnelle Hyperbarie et plongée.

Age moyen des « travailleurs hyperbares » :

Les âges diffèrent suivant la fonction assurée dans le service. Les médecins sont âgés de 45 ans en moyenne et les infirmiers ont autour de 25 ans. La moyenne d'âge dans le service tourne autour de 35 ans.

Nb moyen d'interventions annuelles/ « travailleur hyperbare » :

Les travailleurs du service font (à eux tous) environ 200 plongées par an, mais le nombre diffère suivant les postes.

Avec un pic pour un infirmier qui a 65 plongées / an, les autres (service de réanimation) qui sont soumis au cycle de nuit, plongent moins.

Nb moyen d'années de travail hyperbare / « travailleur hyperbare » :

Pour 4 personnes du service, plus de 10 ans et pour les 6 autres environ 1 an.

Il y a un turnover très important du personnel infirmier notamment en lien avec le fait que les conditions de vie à Paris sont difficiles. Le personnel infirmier du service est très jeune.

La culture dans les armées, veut que les niveaux du personnel paramédical et médical soient corrélés à un niveau d'activités subaquatiques. Un infirmier qui veut obtenir le plus haut degré de formation sera infirmier plongeur hyperbariste (IPH) et aura fait tout ou partie du stage de plongeur démineur. C'est la même chose pour les médecins spécialisés dans le domaine plongée.

La connaissance et la pratique des activités hyperbares dans l'eau confèrent aux travailleurs un savoir et une rigueur que l'air ne saura jamais donner. Les civils n'ont en revanche pas l'obligation d'avoir ces connaissances.

TECHNIQUES D'INTERVENTION EN CONDITIONS HYPERBARES

- **Caisson hospitalier pour air comprimé + mélange**

En France, les plongées médicales hyperbares sont généralement effectuées jusqu'à une profondeur maximale de 50 mètres. L'utilisation de recycleurs n'a pas vraiment lieu d'être dans ce type d'intervention. De nombreuses stratégies de recompression existent pouvant atteindre des

pressions relatives de 10 bars (sans que celles-ci aient clairement démontré une meilleure efficience).l

Dans la pratique, la majorité des interventions ont lieu à 30 mètres de profondeurs maximum car le bénéfice thérapeutique d'une compression à 50 mètres plutôt qu'à 30 mètres est dans la majorité des cas vraisemblablement modeste, tandis que les contraintes hyperbares pour le personnel sont clairement supérieures.

Des mises en pression à 50 mètres sont réalisées dans le cadre de la formation des personnels de la classe 2, mention C.

- Pour les caissons hospitaliers : Que pensez-vous de la norme qui définit le matériel médical avec idée de protéger les patients, mais pas nécessairement le personnel co-exposé ?

Norme 14.931 : Norme datant de 2006 et concernant le fonctionnement des caissons ou plus précisément, des chambres hyperbares à usage thérapeutique.

Cette norme édicte un ensemble de préceptes intéressants. Pascal Constantin recommande de respecter cette norme, mais préconise des ajustements dans 2 domaines en particulier :

- Concernant le bruit, la norme autorise un maximum jusqu'à 70-80 décibels maximum alors que c'est un niveau sonore très élevé. Idéalement, Pascal Constantin pense que 40 décibels serait mieux adaptés en bruit maximum et 20 décibels en bruit normal (avec fonctionnement de la ventilation. Par ailleurs, le bruit à l'intérieur du caisson complique les communications entre l'intérieur et l'extérieur du caisson.
- Concernant le confort thermique, il est instauré par la norme dans l'intervalle 15 à 40 °C et cela semble insuffisant (et très élevé !), il faudrait être un peu plus restrictif et l'instaurer dans un intervalle plus restreint, entre 20 et 30 °C.

Maintenance du matériel

Suite à une réponse à un appel d'offre, les opérations de maintenance du caisson et du matériel à l'intérieur sont réalisées par la société HAUX, et la société la COMEX .

Ré-épreuve

Pour les caissons qui descendent jusqu'à 50 mètres voire plus (Toulon, Lyon et Lille), la ré-épreuve est décennale. Pour les caissons qui ne descendent pas au-delà de 30 mètres, il n'y a pas de ré-épreuve.

Cette ré-épreuve implique de remplir le caisson d'eau. Sous le poids de cette eau, la contrainte appliquée sur la dalle qui supporte le caisson est très forte, alors qu'elle n'a pas nécessairement été conçue pour cela. Cette ré-épreuve est par ailleurs très coûteuse.

Contrôle annuel des équipements individuels

Dans le service, 2 types de matériels de distribution d'oxygène sont utilisés : des détendeurs et des débilitres avec ballons. Il n'y a pas d'entretien, de révision ni de contrôle particuliers pour les débilitres ; les détendeurs doivent bénéficier d'une révision périodique. Toutefois la prise de risque devant un détendeur qui ne fonctionne pas ou un ballon percé n'est pas du tout la même que pour les plongées en immersion puisqu'ici on se trouve au sec et à l'air.

Prophylaxie

Pour Pascal Constantin, tout service hyperbare doit établir une procédure de nettoyage de tous ses équipements. Cette procédure est validée par l'infirmière hygiéniste et le comité de lutte contre

les infections nosocomiales (CLIN). Les procédures définissent les nettoyages quotidiens à effectuer, les nettoyages hebdomadaires et semestriels.

Le nettoyage des masques des patients est quotidien (réutilisables) par trempage dans une solution désinfectante. Les détendeurs utilisés dans une chambre hyperbare ne sont pas les mêmes que les détendeurs de plongée, ils ne sont pas en contact avec la bouche des patients. La tuyauterie de l'installation n'est pas nettoyée de l'intérieur.

Le Code européen de bonne conduite, est aujourd'hui normatif sur la facturation à la sécurité sociale d'un acte (des conditions précises sont décrites). Dans la pratique, il est impossible de nettoyer une enceinte hyperbare ancienne pour atteindre le niveau d'aseptie d'une chambre de réanimation par exemple. Il faudrait intégrer cette notion au moment de la conception. Actuellement, des procédures raisonnables de nettoyage peuvent néanmoins être mises en place.

Le nettoyage de l'intérieur et de l'extérieur de l'enceinte hyperbare est effectué par le personnel classé, les infirmiers et les opérateurs de caisson thérapeutique qui le manipulent. Le nettoyage est effectué quotidiennement pour tout ce qui est en contact avec les patients, de manière hebdomadaire, vont être sorti du matériel (brancard, valise d'urgence) pour le nettoyer et semestriellement, ils démontent le plancher et nettoient sous le plancher.

Le nettoyage sera d'autant mieux fait que le matériel a été conçu pour ça. Entre un caisson de plateforme et un caisson thérapeutique, ce n'est pas du tout la même population qui occupe les caissons et les risques sont donc très différents. Certains patients ont des maladies contagieuses très graves qui ne doivent pas être transmises. Une organisation des séances doit donc également être envisagée pour limiter le risque nosocomial.

- **Problème de matériel à signaler ?**

Un problème soulevé ici est le fait que tout matériel qui entre dans le caisson devrait être agréé pour être utilisé en conditions hyperbares, ce qui n'est pas le cas. Dans les faits, beaucoup de matériels ne sont pas testés pour être utilisé en hyperbarie. C'est un problème de développement économique.

Il existe des procédures validées pour tester l'utilisation d'appareils en conditions hyperbares. Le problème c'est qu'ensuite, l'utilisation de ces matériels en hyperbarie met en jeu la responsabilité de la personne qui a fait les tests (le médecin par exemple) et non celle de l'industriel qui a conçu l'appareil.

Si on prend l'exemple du ventilateur Siaretron, agréé en hyperbarie ; ce dernier est loin d'avoir un fonctionnement satisfaisant.

Description de l'activité/du type de chantier

Equipe minimale sur le site (pour encadrer les interventions) :

D'un point de vue légal, d'après le décret de 2011, il faut 2 personnels (1 opérateurs + 1 accompagnant pour intervenir à l'intérieur).

Du point de vue normatif et d'après le code européen de bonne conduite, il faut 3 personnels : un surveillant à l'extérieur, un infirmier accompagnant (apte à l'hyperbarie) et un chef des opérations hyperbares qui est en général le médecin prescripteur. Le code européen a été repris par la sécurité sociale pour pouvoir facturer un acte.

Durées de plongée à sec

La haute autorité de santé (HAS) 2007 a défini une séance d'oxygénothérapie comme étant de l'oxygène délivré à une pression supérieure à la pression atmosphérique pendant un temps minimum de 100 minutes.

Pour des raisons médicales, on peut délivrer plus ou moins longtemps d'oxygène que ce que donne cette définition.

Pour un accident de désaturation grave, les soignants préconiseront plutôt une table profonde, longue et précoce : table à 30 mètres avec une durée maximale de 7h30 à 8 heures (classique maximum de durée d'une table thérapeutique).

Pour des pathologies graves, pour lesquelles l'état clinique du patient n'est pas stable il peut être pertinent de faire une séance à seulement 70 minutes.

Conditions d'utilisation

En moyenne, 3 à 4 séances sont organisées chaque jour dans le caisson. La fréquence d'utilisation des caissons dépasse les 700 compressions par an. Après la première séance au cours de laquelle ils bénéficient d'une instruction par un infirmier, les patients plongent souvent seuls (entre eux, non accompagnés par un personnel classé).

La pression habituelle pour les traitements chroniques est de 2,5 ATA ce qui correspond à une profondeur de 15 mètres (entre 12 et 18 mètres dans la pratique). La pression maximale appliquée est de 4 ATA (30 mètres).

Le mieux pour le personnel est que la durée d'intervention soit la moins longue possible. Parmi les bonnes pratiques recommandées par le service hyperbare du VDG, Pascal Constantin a précisé qu'un palier inférieur à 5 minutes pour le pour le personnel accompagnant est la norme, sauf cas exceptionnels où les personnels sont obligés de rester en immersion toute la table mais pour une durée ne dépassant pas 8 heures.

Sauf situation exceptionnelle (et dérogative) ; les personnels ne devraient pas faire plus de 2 interventions sous pression par jour. Les accidents de désaturation chez les personnels des services hyperbares ne sont pas rares.

- **Avantages de la mise en œuvre des techniques mentionnées**

L'avantage des paliers de décompression à l'oxygène par rapport à l'air est qu'ils permettent de minorer le risque d'accident de décompression et (éventuellement) de minimiser la durée de la décompression.

- **Limites d'utilisation à préconiser**

❖ Pour les accompagnants, il ne faut pas prendre d'oxygène en dessous de 12 mètres (2,2 ATA) car il existe potentiellement un risque convulsif hyperoxique. Comme dans les autres mentions, il faut respecter la limite de pression partielle d'oxygène que l'on peut respirer aux paliers.

❖ L'utilisation d'O_2 est également limitée par la pression maximale respirée et la durée de respiration tolérées avant apparition des effets toxiques pulmonaires de l'O_2. Une limite de 300 UPTD (unit pulmonary toxic dose) par 24h parait raisonnable.

❖ La limite de l'hyperbarie médicale est habituellement de 6 ATA (au-delà, classe IIIC, cela correspond à des contraintes particulières (essais, soutien de chantiers spécifiques).

❖ La limite de 5,6 bars de pression partielle d'azote, pour prévenir la narcose à l'azote.

Formation (personnes et matériel)

Les personnels sont formés à la mention C, classe 2 par des organismes agréés définis par arrêté, tels l'INPP, l'Ecole du Val de Grâce…

NATURE DES GAZ UTILISÉS

Par les patients :

- Air médical : OXYGENE + AZOTE

Une norme définit ce mélange respiratoire. C'est de l'air refabriqué à partir des gaz constituants de l'air. Il a un degré d'hygrométrie très faible et ne contient en théorie pas d'impuretés.

Le Val de Grâce se fournit en bouteilles d'air médical auprès de la société SOL, mais l'air médical habituellement utilisé est issu des compresseurs.

Le contrôle des gaz respiratoires est sous-traité via un contrat de maintenance qui concerne l'ensemble des installations de gaz de l'hôpital. Ce contrôle est effectué 2 fois par an.

Par le personnel accompagnant :

- AIR et OXYGENE : Les soignants respirent de l'Air médical (jusqu'à 6 ATA) et font des paliers à l'Oxygène (2,2 bar). Il arrive que les personnels respirent de l'oxygène en surface pour minorer le GPS (groupe de plongées successives), mais c'est très rare.

- L'utilisation de NITROX et d'HELIOX à la place de l'air sont techniquement possibles et présentent l'intérêt de minorer la saturation et de préserver de la fatigue, mais d'un point de vue pratique c'est contraignant car cela oblige le personnel à porter un masque et risque de l'entraver dans ses activités médicales au sein du caisson.

- L'utilisation de TRIMIX ne présente aucun intérêt dans l'hyperbarie médicale.

Traçabilité :

La traçabilité des interventions est assurée par la tenue de relevés de chaque « plongée » avec un descriptif des gaz et mélanges respiratoires utilisés qui sont monitorés en continu durant chaque intervention.

Types de tables de décompression utilisés

Dans le service, sont utilisées les tables MN90 par soucis d'unicité de formation pour tout le personnel plongeur militaire.

Les ordinateurs de plongée ne sont pas utilisés pour gérer les plongées, pour 2 raisons principales :

1) C'est l'opérateur à l'extérieur qui dirige la plongée, l'ordinateur ne peut pas entrainer une modification des paramètres de plongée. Il est toutefois possible d'en utiliser un pour surveiller sa plongée.
2) Chacun ne peut pas choisir sa procédure de décompression. Ceci est du domaine des procédures qui sont validées pour le service par l'employeur en accord avec le chef d'opération hyperbare.

EFFETS SANITAIRES RECENSES LIES A L'EXPOSITION DES TRAVAILLEURS AUX CONDITIONS HYPERBARES / ACCIDENTOLOGIE

Définition de(s) l'effet(s) rapporté(s) parmi le personnel du service de médecine hyperbare

Les accidents barotraumatiques sont rares chez les professionnels, et peuvent potentiellement toucher tous les organes creux : les sinus, l'oreille (moyenne et interne) … avec des séquelles possibles.

Cause fréquente : en dépit d'un rhume associé à des trompes d'Eustache bouchées, le travailleur accompagne quand même son patient en caisson.

Les accidents de désaturation ne sont pas rares, Pascal Constantin en a déjà observé 2 au cours de sa carrière professionnelle personnel.

Cause fréquente : en dépit d'une fatigue importante, le travailleur effectue une plongée longue qui favorise le déclenchement d'un accident de désaturation.

Les accidents biochimiques,

- Les narcoses à l'azote peuvent arriver dès 30 mètres de profondeur.
- L'apparition d'effets toxiques neurologiques liés à l'O_2 est possible, mais très rare si les normes sont respectées. Chez le personnel médical du Val de Grâce, Pascal Constantin n'a pas connu ce type d'effets mais il a pu les observer parmi ses patients. Un point sur lequel il faut attirer l'attention des plongeurs, c'est de ne pas faire au cours d'une plongée, les mêmes tables pour les accompagnants que pour les malades.

Circonstances de survenue

Parmi les facteurs favorisants, Pascal Constantin recense l'âge jeune des personnels (et la vie « active » inhérente cette tranche d'âge), les horaires décalés et le port de charges lourdes pendant la désaturation qui favorisent la fatigue. La fatigue des personnels soignants est par ailleurs induite par leurs activités en conditions hyperbares. Cette fatigue peut représenter une source d'erreurs.

Gravité

Les accidents de plongée chez le personnel accompagnant auxquels a pu assister Pascal Constantin ont tous évolué sans séquelle. En revanche, les personnels concernés avaient subi des accidents de désaturation ont tous été déclarés inaptes par la suite, ce qui nécessite un reclassement de ces personnels.

L'inaptitude définitive peut être prononcée par le médecin du travail après par exemple un accident de désaturation, à partir du moment où le travailleur présente des séquelles neurologiques.

Prise en charge de l'accident

Les accidentés de plongée sont mis sous oxygène, recompression thérapeutique éventuelle.

Le diagnostic est difficile car les symptômes sont polymorphes mais également parce qu'il y a un déni lié au fait que ce sont les plongeurs ont tendance à minimiser voire à dissimuler leurs pathologies.

Suites de l'accident

Le suivi médical spécifique dépend des séquelles éventuelles.

Il parait logique de contre-indiquer la pratique des activités subaquatiques suite à un accident de désaturation dans une enceinte hyperbare, si cet accident a entraîné une inaptitude à l'hyperbarie au sec.

Préconisation pour améliorer la sécurité des travailleurs en milieu hyperbare avec ce type de mélange

Il serait intéressant de réguler la pression partielle d'O_2 et de N_2 dans les enceintes afin de minorer le risque incendie lors des fuites des masques.

SNETI - Syndicat national des entrepreneurs de travaux immergés

M. Jean LELIEVRE - Président du SNETI, Représentant l'industrie de la plongée française à l'EDTC (European Diving Technology Committee)

Date de l'audition : 25/11/2013

Lieu de l'audition : Paris

M. Lelièvre est Scaphandrier Classe IIA - Vice président INPP /Représentant l'industrie de la plongée française à l'EDTC (European Diving Technology Committee) association européenne/ moniteur professionnel de plongée loisir BEES 1 N° 1394-0741 - représentant les entreprises mention A au groupe de travail de rédaction du projet de réglementation pour les mentions D (travaux souterrain – membre associé de Medsubhyp - Connaissance d'organismes et syndicats étatiques étrangers : IMCA/ OGP/A DC /A DCI/UKOA/NPD

DEFINITION DE LA POPULATION PROFESSIONNELLE

Mention des « travailleurs hyperbares »

Concernant les travaux en conditions hyperbares, 2 mentions sont concernées :

- Les travailleurs de la mention A (scaphandriers) (travaux en immersion) : actuellement 1500 travailleurs sont à jour de leur visite médicale ou possèdent un diplôme valide (certificat d'aptitude à l'hyperbarie de moins de 10 ans ou renouvelé dans les délais)

- Les travailleurs de la mention D Tubistes ou hyperbaristes (travaux au sec) qui représentent une population temporaire très différente de celle des travaux de la mention A. ces travailleurs reçoivent une formation ponctuelle pour des travaux particuliers.

Nombre

Le nombre effectif de travailleurs mention A représente actuellement environ 400 à 450 ETP pour les entreprises métropolitaines répartis entre 200 CDI et 250 intérimaires piochés parmi les 1300 personnes restantes. Ces travailleurs sont censés plonger au rythme de 5 jours par semaine.

Beaucoup de salariés sont formés alors qu'il y a en réalité peu d'emplois disponibles. Environ 120 scaphandriers sont formés par an alors que le besoin est estimé à seulement 20 travailleurs à l'année. Après 5 années en moyenne, 90% des personnes formées quittent la profession faute de travail à temps plein ou quasi temps plein

Age moyen des « travailleurs hyperbares »

L'âge moyen des travailleurs est de **35 ans** avec un intervalle allant de 20/25 ans pour les plus jeunes jusqu'à 60/65 ans pour les plus âgés. La population est vieillissante car cette profession n'intéresse pas la population jeune, notamment parce qu'il s'agit d'un métier compliqué impliquant de nombreuses contraintes (déplacements permanents et chantiers de durée variable) rendant l'établissement et/ou le maintien d'une vie de famille très difficile.

Nb moyen d'interventions annuelles/ « travailleur hyperbare »

Les salariés travaillent environ 225 jours par an ce qui représente 180 à 225 plongées annuelles. Le travail subaquatique est limité à 3 heures/homme/ par jour).

Nombre moyen d'interventions annuelles pour l'ensemble des travailleurs

Si on s'intéresse à la grande majorité des scaphandriers de la mention A, sur une année l'activité de ces professionnels représente environ 59400 interventions (225jours x 400 plongeurs x 2/3 –la cellule de base étant de 3 personnes avec en moyenne 2 personnes sur 3 qui plongent).

Une petite population de 30 à 50 personnes qui travaillent à l'étranger pour Total ou équivalents ou les filiales locales (Afrique de l'Ouest francophone) a un rythme d'intervention différent. Il s'agit des Scaphandriers off-shore qui sont embauchés avec un minimum requis de 10 ans d'expérience. Aucune souveraineté nationale ne s'exerce dans ces zones de travail (eaux internationales), le fonctionnement réglementaire est donc au choix du maître d'ouvrage, le code du travail français ne s'appliquant donc plus. Cette profession est plutôt attractive mais présente des contraintes de travail importantes (rotation des équipes tous les 45 jours, travail 7jours sur 7, 12 heures par jour) et est difficile à vivre socialement.

Nb moyen d'années de travail hyperbare / « travailleur hyperbare »

Après une importante érosion de départ, les travailleurs font une carrière de **15 ans en moyenne** (jusqu'à l'âge de 30 à 35 ans) en lien notamment avec les contraintes de pénibilité du travail et de vie familiale. Certains font néanmoins des carrières pouvant aller jusqu'à 40 années.

TECHNIQUES D'INTERVENTION EN CONDITIONS HYPERBARES

1) **Techniques et gaz respiratoires utilisés**

Narguilé

La technique standard est le narguilé, qu'il s'agisse d'un départ depuis la surface, d'une bulle de plongée oud' une tourelle. Elle doit être privilégiée, mais dans certains cas elle n'est pas possible.

Dans 98 % des cas, il s'agit de plongées à l'air atmosphérique comprimé; 30 à 40 % des plongées se font avec l'utilisation d'oxygène pour les paliers et plus rarement, les plongées ont lieu au nitrox (air enrichi en oxygène).

L'utilisation du trimix (ou mélange ternaire) est interdite de manière indirecte, en lien avec une aberration réglementaire dans l'écriture de l'arrêté du 30 octobre 2012 concernant les seuils de taux d'oxygène imposés qui rendent l'usage du trimix incompatible avec les tables françaises.

Système + mélange

L'utilisation de ces techniques concerne environ 8à 12 scaphandriers par an pour des plongées au-delà de 50 mètres de profondeur. De 0 à 39 mètres, le gaz respiratoire utilisé est le nitrox, de 39 à 42 mètres, il s'agit d'air comprimé (plage particulière) et au-delà de 42 mètres, il s'agit de trimix, ou d'héliox.

SCUBA

Depuis le 30 octobre 2012, l'utilisation du SCUBA est interdite pour les travailleurs de la mention A.

Cette interdiction fait suite à la demande de la CGT qui souhaitait couper court aux potentiels abus d'utilisation de cette technique, notamment par les petites sociétés qui ne mettaient pas en œuvre la technique du narguilé (plus couteuse matériellement).

Pour jean Lelièvre, il aurait été intéressant de laisser une porte-ouverte à l'utilisation du scaphandre autonome, dans certains cas précis et sous réserve de l'obtention d'autorisations contrôlées. Disposition prévues par le Code du Travail mais qui fonctionne mal en réalité.

Apnée

L'apnée ne concerne pas les travailleurs de cette mention, hormis lors de leur formation, pour tester l'aquaticité des futurs plongeurs professionnels.

Recycleur

L'utilisation du recycleur est interdite pour les scaphandriers de la mention A.

Le recycleur est utilisé traditionnellement pour des applications en spéléologie mais pourrait être utile également dans le domaine des travaux sous-marins pour les plongées dans des galeries ou sous la glace (dites sous plafond), dans le cadre de la réalisation de relevés topographiques ou pour la réalisation de mesures en amont de la mise en œuvre d'un chantier (investigation, contrôles, repérages, mesures diverses, …).

Cette technique fournirait un avantage en terme de sécurité pour les plongeurs de la mention A parce qu'elle permet une durée de survie plus longue en cas d'incident et offre la possibilité de gérer cet incident, même lorsqu'il s'agit de travaux à grande profondeur (elle permet par exemple au scaphandrier de regagner la tourelle ou la bulle de plongée pour être remonté).

L'usage du recycleur présente des avantages physiologiques importants au prix d'une complexité technique matérielle solvable et bien connue.

Jean Lelièvre et la profession souhaitent qu'il y ait une évolution prudentielle mais favorable d'accès à ces techniques pour les travailleurs de la mention A.

L'usage du recycleur présente également un intérêt en termes de sécurité pour les travaux de la mention D par la mise en œuvre d'un système qui évite les rejets d'oxygène lors des paliers de décompression (très inflammable). En effet, les travailleurs des tunneliers interviennent dans des conditions physiquement difficiles impliquant une ventilation respiratoire augmentée associée à un accroissement du taux de CO_2 dégagé, puis à une suroxygénation de l'environnement (rejet de l'oxygène exhalée), avec un risque accru d'incendie et d'explosion.

2) Type de matériel utilisé

- ***Pour le recycleur : La norme européenne NF EN 14143 vous parait-elle suffisante ? Applicable ? Adaptée ?***

Cette norme existe pour la conception du « produit recycleur », en revanche, aucune norme/certification n'existe pour l'utilisation, la mise en œuvre du recycleur.

- ***Pour les sas de tunneliers : La norme Européenne EN 12110 vous semble-t- bien adaptée ?***

Cette norme est bien adaptée, elle n'est cependant pas tournée vers l'utilisation de mélanges à base d'hélium (héliox ou trimix), mais n'est pas « empêchante ».

- ***Pour les caissons hospitaliers : Que pensez-vous de la norme qui définit le matériel médical avec idée de protéger les patients, mais pas nécessairement le personnel co-exposé ?***

C'est une norme de vision « germanique » qui ne considère que les patients. Selon cette logique, les médecins hospitaliers, urgentistes, hyperbaristes et infirmiers formés à l'utilisation du caisson ne doivent pas avoir besoin de normes pour travailler intelligemment. Dans les arrêtés d'application de la mention C, il serait utile de prendre en considération cet aspect sécurité du personnel et que des préconisations existent pour les patients et le personnel médical.

Cependant Jean Lelièvre précise qu'il n'est pas titulaire de mandat de ces professions, ni pratiquant ni expert, et que son avis ne saurait remplacer celui des pratiquants concernés.

3) Maintenance du matériel

- ***Qui ?***

La maintenance du matériel est faite pour partie par les scaphandriers eux-mêmes mais également par les fabricants de matériel qui proposent d'ailleurs, dans le cadre de l'entreprise, des stages pour apprendre aux travailleurs à réparer et entretenir correctement leur matériel (notice technique, suivi des évolutions).

En cas d'utilisation de recycleurs, il faudra penser à la manière dont sera mise en place cette maintenance. La tendance actuelle est à l'individualisation du matériel dans un but hygiénique (cagoules de protection…), mais cela reste dépendant des moyens financiers dont dispose l'entreprise.

- ***Durée de vie d'un appareil ?***

C'est très variable suivant les appareils considérés puisque certaines pièces se changent toutes les 25 heures (membranes des détendeurs, joints…) alors que les plus vieux caissons de décompression encore en service datent de 1975. D'une manière générale, la qualité du matériel n'est plus un obstacle. Nous bénéficions des avancées technologiques générées et financées par l'offshore pétrolier.

- ***Requalification ? (pour les bouteilles, réservoirs)***

Un contrôle visuel annuel est réalisé ainsi qu'une requalification tous les 2 ans (tous les 5 ans dans le cas où il y a des scaphandriers techniciens d'inspection visuelle au sein de la société d'après l'arrêté sur les appareils en pression de juillet 2004).

- ***Contrôle annuel des EPI ? (casques, détendeurs, bouteilles, robinetteries…)***

Cela dépend des équipements. Les contrôles peuvent être annuels voire beaucoup plus fréquents selon les cas. Les casques de plongée doivent par exemple être vérifiés à chaque plongée. Tout est bien codifié par la réglementation (tests fonctionnels préalables à l'utilisation).

- ***Modalités - traçabilité – Prophylaxie***

Les modalités de contrôle sont celles préconisées par les fabricants et sont adaptées suivant les retours d'expérience des utilisateurs (au sein de la société).

Le niveau d'exigences en termes de traçabilité dépend de chaque société. Beaucoup de sociétés commencent à être certifiées ISO 9001 et quelques unes sont également ISO 14001 et OHSAS 18001. Les procès verbal de contrôle/épreuve des matériels sont émis et de plus en plus réclamé par les clients.

Le matériel est désinfecté au Septivon, mais il n'y a aucune obligation réglementaire, ce point est un axe d'amélioration.

- ***Problème de matériel à signaler ?***

Un problème à souligner concerne la capacité d'auto-certification CE de certains matériels, introduite par la directive « Machines » (directive 2006/42/CE). Certains matériels vendus en Europe peuvent ainsi être auto-certifiés CE. Si les personnes ne sont pas expertes, il est possible d'acheter du matériel faussement certifié CE (par exemple des postes à souder il y a quelques années, produits dans le Sud de l'Europe et porteurs d'auto-certifications frauduleuses).

4) Description de l'activité/du type de chantier

Conformité réglementaire des entreprises

Concernant l'application de la réglementation en vigueur, 3 types de profils se distinguent pour les sociétés de travaux subaquatiques:

- Les grosses structures, suffisamment organisées pour être à jour vis-à-vis des exigences réglementaires;
- Les sociétés en cours de mise en conformité vis-à-vis de la réglementation ;
- Les sociétés très en retard pour se conformer aux exigences réglementaires (n'appliquent pas encore le décret de 1990).

Ont été recensées environ 160 à 180 sociétés qui disent faire de la plongée professionnelle en France. Les 20 premières en termes de taille sont membres adhérentes du SNETI et sont donc régulièrement informées des exigences et préconisations en termes d'hygiène et de sécurité. Certaines sociétés indépendantes ne souhaitent pas se fédérer et les dernières ne font des travaux de plongée que au-delà du cadre d'une activité annexe, ce qui pose des problèmes de sécurité liés à la pauvreté du matériel, peu ou pas de structures documentaires liées à la sécurité, équipes disparates et temporaires, *etc.*

Pour ces raisons, le SNETI est favorable (c'est lui qui l'a demandé au Ministère du Travail) à la mise en place d'une certification des entreprises de travaux pour les mentions A et D, suivant un référentiel en cours de définition qui serait au minimum les exigences dictées par le décret de 2011 et ses arrêtés d'application (il semble qu'il y ait des difficultés à finaliser ce dossier par rapport au CFRAC et à l'AFNOR).

Les tunneliers sont des filiales directes ou indirectes des majors (Vinci, Bouygues, Eiffage…). Lors des travaux au sec, ces entreprises sont beaucoup plus ouvertes aux conditions d'hygiène et de sécurité, aménagements ergonomiques et sécuritaires que lors des chantiers organisés sous l'eau. Ceci s'explique par le fait qu'ils impliquent plus de leurs personnels sur ces chantiers, que la machine leur appartient (coûte plusieurs centaines de millions d'euros). Les chantiers modernes au sec faits pour le compte des grandes majors françaises, répondent à des conditions ergonomiques, d'hygiène et de sécurité sanitaire très importantes.

Equipe minimale sur le site (pour encadrer les interventions)

Le Ministère a refusé dans l'arrêté du 30 Octobre 2102 mention A de reconduire le terme de scaphandrier (pourtant consacré et en usage depuis 1850) au profit de cinq vocable différents : opérateur, personne, personnels, travailleurs, techniciens,…. Cela pose ensuite un problème de lisibilité.

Point sur la terminologie réglementaire (pose d'ailleurs des problèmes pour les plongées bulles et tourelles). Les « opérateurs » ne sont pas forcément des postes occupés par des scaphandriers (on ne sait plus dans une équipe qui est scaphandrier). Cela ne permet plus de différencier les personnels qui doivent être classés de ceux qui ne le sont pas

Au moins 3 personnes doivent être présentes sur le chantier :

- Scaphandrier fond
- Scaphandrier assistant en surface (peut prendre la casquette de scaphandrier de secours en cas de problème)
- Surveillant de plongée

Une personne supplémentaire (pas nécessairement un scaphandrier) peut être requise pour manipuler le narguilé selon la configuration du site.

Dans le cadre de la plongée bulle, l'équipe minimale requise est de 7 personnes.

Les rôles et fonctions sont parfaitement définis par la réglementation suivant les situations (normale, dégradée, secours). La déclinaison opérationnelle du texte est néanmoins complexe sur certains aspects.

5) Conditions d'utilisation

Les scaphandriers sont amenés à plonger dans de l'eau plus ou moins propre, mais pas uniquement.

De plus en plus de plongées ont par exemple lieu en stations d'épuration et compte tenu du niveau de contamination de l'eau, nécessitent l'utilisation par les travailleurs de casques spécifiques à double alimentation et de soupapes d'expiration à double étage.

Ils plongent également dans tous les liquides de l'agro-alimentaire ainsi que de la chimie (acides…). Les profondeurs d'intervention dans ces conditions sont faibles, de 6 à 12 mètres maximum. Des procédures spécifiques d'habillage des scaphandriers et des accompagnants en surface sont alors nécessaires pour assurer leur sécurité. Ce sont des interventions ponctuelles de durée courte afin de pénaliser le moins possible l'activité industrielle concernée.

6) Avantages/inconvénients de la mise en œuvre des techniques mentionnées

- ***Avantages***

L'usage de l'héliox et du trimix apporte une diminution des désordres neurologiques liés à l'azote puisque ce sont des gaz beaucoup moins narcotiques que l'azote de l'air en plongée. Grâce à ces gaz, les travailleurs ont l'esprit plus clair, ils ont mieux conscience du travail qu'ils doivent réaliser et du milieu dans lequel ils évoluent. Compte tenu de la dangerosité et de la complexité des tâches qu'ils doivent exécuter en immersion, l'usage de ces gaz est une pratique plus sécuritaire.

Ces pratiques permettent de rendre les interventions plus confortables et moins stressantes. Il ne faut pas en effet négliger la part de stress importante inhérente à ces métiers puisque les scaphandriers sont confrontés à de nombreux facteurs extérieurs qu'ils ne maitrisent pas.

Le narguilé permet de maintenir un lien continu entre le scaphandrier et la surface. Pendant toute l'intervention, un pneumomètre suit et enregistre la profondeur de la plongée, les autres paramètres sont aussi suivis et enregistrés en surface (gaz, pression de gaz, profondeurs, durées…). En cas d'incident au fond, les secours envoyés n'ont qu'à suivre le narguilé pour atteindre le scaphandrier en difficulté.

Les plongées profondes effectuées via des bulles ou des tourelles présentent l'avantage en matière de sécurité de permettre des remontées d'urgence des travailleurs en cas de problème.

L'usage du recycleur permet comme expliqué précédemment d'augmenter l'autonomie sous l'eau et ainsi le temps de survie en cas de problème. Cette technique offre également l'avantage de respirer le meilleur gaz ou mélange respiratoire possible (le plus adapté) suivant la profondeur à laquelle on se trouve. Elle permet de respirer une quantité adaptée et optimisée d'oxygène qui agit positivement en diminuant la sensation de froid, la fatigue et surtout le risque d'accidents de décompression.

- ***Limites***

Il existe des restrictions d'utilisation de ces techniques pour certains types de travaux.

L'hélium est un gaz très onéreux qui a pour particularité de modifier la voix des scaphandriers. Son utilisation implique donc la mise en place d'un mode de communication particulier pour les échanges entre le travailleur et la personne à l'autre bout du narguilé. L'hélium provoque

également un effet de froid dans les poumons de part sa faible densité et sa fluidité. Sachant que la première source de fatigue chez le scaphandrier est liée à la déperdition de chaleur, l'utilisation de l'hélium implique de mettre en place des réchauffeurs de gaz, que le scaphandrier porte une combinaison réchauffée par circulation d'eau chaude à l'intérieur et également un système de réchauffement du détendeur.

7) Formation (personnes et matériel)

-**Durée** : La formation des scaphandriers dure 9 semaines

-**Contenu** : Une modernisation/actualisation du contenu pédagogique est nécessaire notamment sur l'apprentissage par les scaphandriers de la mise en place des équipements sur un chantier. En effet, pendant la formation, les élèves arrivent et s'entrainent sur des structures/ateliers déjà mises en place, ils ne savent donc pas installer les équipements.

Il manque l'aspect opérationnel dans la formation dispensée aux élèves, à savoir comment se passent les choses sur le terrain de manière pratique, technique et relationnelle.

- **Prérequis** : Pour le SNETI et les entreprises de travaux sous-marins, il serait souhaitable que les élèves acceptés dans la formation aient déjà une expérience professionnelle même minime dans le BTP, génie civil, métallurgie. Actuellement, c'est l'inverse qui est fait, on sélectionne d'abord des plongeurs que l'on va ensuite former aux travaux sous-marins pour en faire des scaphandriers

Ces manques ont incité les entreprises à construire un parcours de professionnalisation post-CAH qui est en cours d'acceptation qui comprendra 4 modules professionnalisant plus techniques, notamment sur le type de gestes et de travaux à réaliser au quotidien avec financement possible du parcours par les entreprises. L'idée serait à terme d'ajouter un module fait par l'entreprise, mais il est difficile de dépêcher des personnes disponibles dans ces structures. (Titre professionnel de scaphandrier des Travaux publics validé par la DGEFP en janvier 2014 et publié par arrêté Ministériel))

8) Remise à niveau des connaissances sur l'utilisation des matériels (entretien, maintenance, réparation, etc.)

- **Modalités**

La remise à niveau est continue, d'une part du fait des fabricants concernant les aspects techniques et d'autre part par le CPH (conseiller à la prévention hyperbare), plutôt concernant la veille réglementaire et l'évolution des bonnes pratiques.

- **Périodicité**

Le certificat d'aptitude à l'hyperbarie (CAH) est valable 10 ans. Il est question de réduire cette durée à 5 ans, les travailleurs devront suivre 2 jours de remise à niveau sanctionnés par un examen. Un échec pourrait entrainer la perte du CAH et entrainer une nouvelle formation (12 000 Euros)).

- **Traçabilité des parcours**

Les scaphandriers sont censés entretenir un carnet, le log-book, dans lequel ils consignent tous les paramètres propres à chacune de leurs plongées (environnementaux, matériels, procéduriers...).

Depuis les lois sur la pénibilité, l'employeur est tenu de faire la même chose et doit conserver une liste et un enregistrement de toutes les feuilles de plongée (60000 feuilles par an) qui restent sous format papier (pour le moment, pas d'accord écrit sur la possibilité de les conserver sous format

électronique). Un jeu est communiqué à la Médecine du Travail (qui les refuse verbalement….car non organisés pour gérer ce tonnage de papier…..).

NATURE DES GAZ UTILISES

- **OXYGENE**

Limite en eau : 1,6 bar de pression absolue /soit 6 mètres de profondeur

En saturation : 350 à 400 millibars

En décompression de saturation : 500 à 600 millibars

environ 100 personnes concernées parmi les entreprises (paliers à l'O2)

- **AIR**

Limite : 50 mètres de profondeur

Environ 400 personnes concernées (toute la population active des scaphandriers

- **NITROX (O2 – N2)**

Du plus pauvre en oxygène [O2 (25%) / N2 (75%)] au plus riche [O2 (70% max) / N2 (30%)]

Limite : 43 mètres de profondeur (limite pratique d'utilisation)

Environ 50 personnes sur 400 concernées.

- **TRIMIX (O2 – N2 – He)**

D'après la théorie, pour fabriquer ces mélanges O2/N2/He, on essaye de mettre le maximum d'oxygène suivant la profondeur à laquelle on doit descendre (1,6 bar) et les limites de toxicité pulmonaire de l'oxygène(UPTD/OTU), à cela on associe un pourcentage réduit d'azote (équivalent narcotique pour l'azote soit une (fraction d'azote correspondant à 35-40 mètres de profondeur) puis qsp 100% à l' hélium.

Dans la pratique, on commence avec des Trimix (18/41/41) pour finir vers (10/45/45) ou (10/30/60).

Limite : 150 mètres de profondeur (pas de table au-delà en France).

D'après les tables disponibles en France, l'intérêt du trimix commence à 50 mètres, il pourrait être intéressant de démarrer son usage vers 40/42 mètres car cela commence à avoir un intérêt. Opérationnellement, au-delà de 150 mètres, les Héliox prennent forcément le relais car les trimix ne présentent plus aucun avantage (dans la pratique, les héliox prennent le relais dès 120 mètres).

Aucun travailleur de la mention A n'est a priori concerné en métropole puisqu'il n'existe pas de tables publiées officiellement.

- **HELIOX (O2 – He)**

Toute la gamme possible à partir de :

O2 (2%) / He (98%) : permettent d'aller en plongée jusqu'à 350 mètres (en France, la plongée système est limitée à 200 mètres de par les tables publiées).

O2 (20%) / He (80%) : équivalent de l'air, même plage d'utilisation que l'air

O2 (50%) / He (50%) : utilisé dans le traitement des accidents de décompression neurologiques sur des tables de 30 mètres ou de 50 mètres.

Limite : En France, son utilisation commence à partir de 30 mètres et s'étend jusqu'à 200 mètres. Des tables à l'étranger sont disponibles jusqu'à 450 mètres de profondeur (Norvège, Brésil, …..).

Entre 18-20 personnes concernées (société Hydrokarst principalement) pour des plongées spécifiques au-delà de 50 mètres, jusqu'à 75 mètres en bulle et au-delà avec les systèmes de saturation.

Mode de fabrication et modalités d'analyse des gaz :

Les gaz peuvent être achetés directement prêts à l'emploi auprès d'Air Liquide par exemple, Linde, Air Products, AGA,…...

Ils peuvent aussi être fabriqués par l'entreprise. Des analyseurs de gaz permettent de contrôler et éventuellement corriger les mélanges préparés. Le problème est d'avoir des analyseurs de gaz bien étalonnés pour être sûr que la précision qu'ils donnent est réelle, ce pour contrôler en toute sécurité ce qui a été préparé et avoir des fiches de contrôles représentatives. Process quasi industriel à respecter mais qui a fait ses preuves.

Avant exposition :

Tous les fabricants de gaz sont tenus de fournir une fiche d'analyse de gaz ainsi qu'une fiche d'analyse des polluants (CO, CO2, humidité, équivalent méthane…).

Avant la mise en service des gaz, l'entreprise est tenue de faire une vérification et de remplir une 2ème fiche d'analyse.

Sur le chantier, l'employeur est tenu de vérifier les conditions d'utilisation des gaz (que les gaz utilisés sont appropriés aux activités prévues).

Pendant l'exposition et après l'exposition, cela ne sert (plus) à rien car au vu de la technique de plongée utilisée (le narguilé), il n'y a pas de risque de modification du gaz une fois qu'il a été fabriqué et analysé (tout dépend de quand date la fabrication et le contrôle des gaz en question).

La question de la vérification des gaz respiratoires pendant et en aval de l'exposition se pose dans le cadre de l'utilisation de recycleurs puisque l'utilisation des gaz peut être adaptée en temps réel au cours de la plongée en fonction des profondeurs.

Traçabilité : les fiches d'analyse de gaz sont conservées dans le dossier de chantier.

Type de tables de décompression/ Ordinateurs utilisés

Les tables utilisées sont celles publiées par le ministère du travail.

D'autres tables peuvent être utilisées dans la mesure où elles sont reconnues par des autorités compétentes et justification argumentée de l'employeur du choix de tables autres que les tables officielles.

Les ordinateurs de plongées permettent un enregistrement en temps réel des paramètres de la plongée et une analyse à posteriori de ce qui a été fait pendant la plongée, ce qui peut s'avérer très utile notamment pour comprendre des incidents ou erreurs de procédures ou entretenir une base de données servant de matière à l'amélioration des tables.

EFFETS SANITAIRES RECENSES LIES A L'EXPOSITION DES TRAVAILLEURS AUX CONDITIONS HYPERBARES / ACCIDENTOLOGIE

1) Définition de(s) l'effet(s) rapporté(s)

a) Type(s) :

Tous types d'accidents peuvent survenir (barotraumatiques, ADD, biochimique…) ainsi que des incidents liés à la non-qualité des liquides dans lesquels évoluent les plongeurs.

Théoriquement, il ne devrait plus y avoir d'ADD car les plongeurs ne plongent que rarement profond (les tables ont été considérablement améliorée dans les années 80) et très peu d'accidents biochimiques du fait de la qualité des process de fabrication des gaz et de contrôles.

b) Nombre, incidence

Dans la profession franco-française métropolitaine, on recense 15 accidents mortels en 35 ans, en lien notamment avec les périodes de difficultés économiques durant lesquelles des raccourcis sur la sécurité et les matériels peuvent être faits.

c) Circonstances de survenue

Il s'agit principalement d'accident en plongée qualifiés d'accidents de travail (au sens où ils sont liés au travail effectué et non à la plongée elle-même). Ce sont des accidents de chantier de type foulures, manutention (tour de rein), chutes…

2) Cause(s) de l'accident

Les accidents peuvent être liés à une négligence de l'entreprise ou de l'employeur (environ 20% des cas). Il peut s'agir par exemple des secours qui ne sont pas équipés, du choix de plonger en bouteille mais sans palmes, d'un manque de discipline collective, de falsification de certificats médicaux ou encore de faux certificats d'aptitude.

L'erreur humaine (inconscience, non respect des procédures…) est également à l'origine d'une grande partie des accidents.

Le matériel défectueux est rarement en cause, notamment par la mise en place de redondances (appareils en double ou redondances différenciées).

Le scaphandrier peut être sujet à des paniques, qui arrivent le plus souvent au débutant ou en cours de formation et sont donc à priori décelées en amont et ne se produisent plus ensuite en chantier.

Existence de facteurs favorisants ?

- Le facteur « humain » est le facteur le plus sensible.

L'hygiène de vie joue un rôle très important en matière de sécurité. Les pratiques addictives (consommation d'alcool, de drogues…), le manque de sommeil (grands déplacements incessants) et une alimentation inappropriée (sandwichs,…) sont des facteurs favorisants la survenue d'accidents.

La fatigue, inhérente au métier, notamment liée aux localisations dispersées des différents chantiers.

Des antécédents médicaux ou des contre-indications peuvent également être dissimulés au médecin du travail lors des visites régulières.

La santé mentale du travailleur, le stress jouent également un rôle important.

Les plongées successives réalisées suivant les préconisations existantes ne posent pas de problème. Elles deviennent un facteur favorisant la survenue d'accidents lorsqu'elles « sortent des clous ».

3) Prise en charge de l'accident

Le décret/arrêté impose de disposer de caissons de recompression sur site pour pouvoir recomprimer d'urgence le scaphandrier en cas d'accident de décompression avec un accompagnateur, prévenir le médecin du travail et se faire piloter à distance pour conduire la recompression/décompression d'urgence.

Mais il y a un débat concernant ces caissons d'urgence. D'un côté, les médecins hospitaliers sont globalement contre ce procédé, mais de l'autre, les entreprises expliquent que leurs chantiers ont lieu dans des endroits reculés, trop loin des hôpitaux en termes de durée d'acheminement pour assurer une prise en charge suffisamment rapide des accidents. D'autre part les SAMU ou les SDIS n'ont que très rarement des médecins maitrisant l'hyperbarie, et peu d'Hôpitaux disposent de services de médecine hyperbare avec caisson de traitement et encore faut-il que celui –ci soit libre quand survient un accident.

C'est l'HAS (la haute autorité de santé) qui devrait être en charge de trancher sur cette question.

4) Suites de l'accident

L'accidenté a interdiction de plonger jusqu'à ce que le médecin ait rendu son avis. Avis médical qui peut déboucher sur une contre-indication temporaire ou définitive d'exercer ou bien vers une restriction des activités du scaphandrier.

Un ajustement du poste est parfois nécessaire avec la prise d'âge des scaphandriers et l'apparition de fragilités cardiaques qui peuvent par exemple se traduire par une inaptitude à la plongée avec palier donc longue et ou profonde à certains type d'efforts ou d'utilisation d'outillage.

Préconisation pour améliorer la sécurité des travailleurs en milieu hyperbare avec ce type de mélange

Pour optimiser l'efficacité des procédures de secours :

- Il serait pertinent de transposer en France la qualification de « Divers medic technicians » (DMT), qui existe à l'étranger (Angleterre et Norvège). Il s'agit d'un infirmier scaphandrier habilité à n'intervenir que dans le cadre d'une recompression d'urgence (sur un chantier de plongée et nulle part ailleurs) et autorisé à conduire des protocoles complémentaires à la recompression d'urgence (médicamenteux le plus souvent – ou gestes techniques d'urgence injections, sondage urinaire, intubation, pose de perfusion). En France, seul le personnel médical est habilité à pratiquer ce type de gestes.

En effet, lors de la formation de base à l'INPP, un apprentissage de ces gestes peut être dispensé, mais aucune recyclage de formation n'est possible par la suite, les scaphandriers n'ont pas le droit de pratiquer.

Attention car l'absence de cette qualification en France est une cause de disqualification des entreprises françaises lors de contrats à l'étranger car exigences de DMT dans les équipes et qu'il ne peut exister de DMT en France.

- Il est également nécessaire d'améliorer la coordination des secours vers l'hyperbarie en assurant par exemple une mise en relation efficace des différents maillons de la chaîne de secours en cas d'accident (disponibilité d'équipes compétentes en hyperbarie au SAMU).

Transposition en France de mesures étrangères :

L'Angleterre et la Norvège

- Disposent de 2 cellules d'inspection du travail spécialisées dans l'hyperbarie (inshore/offshore) pour vérifier sur le terrain la bonne mise en application de la réglementation. En France, il n'y a aucun contrôle sur le terrain par le Ministère du travail de la mise en application de la réglementation.

- Leur approche réglementaire est différente de la notre dans le sens où ce qui n'est pas défini dans les textes n'est pas interdit, mais s'il doit être mis en œuvre, ce doit être de manière irréprochable.

- Ils préfèrent utiliser des recycleurs plutôt que des bouteilles classiques (donc à capacités limitées) en secours sur les interventions en tourelles (possibilité d'avoir une durée d'intervention et de survie plus longue).

- Un encadrement de la pratique des recycleurs en conditions professionnelles n'existe pas, ce qui rend ces appareils intrinsèquement interdits en plongée professionnelle de travail bien que des avantages seraient constatés à avoir le droit d'utiliser ces outils qui se sont aussi considérablement sécurisés tout en se développant.
- Les bases réglementaires (normes de fabrication et d'homologation de recycleurs utilisés en loisir) sont proches de celles de la norme EN 250 (concernant les appareils respiratoires en plongée) et concernent l'ergonomie respiratoire et l'ampleur de l'autonomie : la dépression qu'il faut créer pour que l'air arrive en alimentation, la résistance à l'expiration dans la cartouche de chaux sodée, la quantité de chaux nécessaire pour fixer le gaz carbonique, le degré d'hygrométrie, de la chaux sodée…

Annexe 4 : Analyse des 58 articles issus de la recherche bibliographique : description et évaluation de leur pertinence.

Référence	Synthèse de l'article	Commentaires et pertinence de l'article
	EFFETS GENERAUX	
Cooper, P. D., C. Van Den Broek, *et al.* (2009). "Hyperbaric chamber attendant safety II: 14-Year health review of multiplace chamber attendants." Diving and Hyperbaric Medicine 39(2): 71-76.	Cet article traite du stress de décompression induit sur le personnel de chambre hyperbare et la validité des tables de décompression utilisées (243 kPa). En effet, les auteurs notent une incidence de 0.76 % d'accident de décompression au sein du personnel en chambre hyperbare. Un examen Doppler a réalisé sur une cohorte prospective puis ensuite un calcul de score de Kisman Masurel.	Pas d'intérêt pour notre expertise. Les auteurs discutent de la validité des tables de décompression utilisées
Cooper, P. D., C. Van Den Broek, *et al.* (2009). "Hyperbaric chamber attendant safety I: Doppler analysis of decompression stress in multiplace chamber attendants." Diving and Hyperbaric Medicine 39(2): 63-70.	Cet article, réalisé par la même équipe, a pour objectif de déterminer l'incidence actuelle d'accidents professionnels (accidents de décompression ou barotraumatismes) parmi le personnel d'une unité clinique hyperbare.	Pas d'intérêt pour notre expertise. Les auteurs traitent des accidents en condition hyperbare de manière générale sans focalisation sur un mélange gazeux.
DeGorordo, A., F. Vallejo-Manzur, *et al.* (2003). "Diving emergencies." Resuscitation 59(2): 171-180.	Le nombre de plongées avec des appareils respiratoires autonomes (SCUBA) augmente considérablement, atteignant un total de 9 millions de personnes aux États-Unis en 2001, et 50 000 au Royaume-Uni en 1985. Au cours des 10 dernières années, de nouveaux progrès, l'amélioration des équipements et l'amélioration de la formation des plongeurs ont sécurisé la plongée. La plupart des accidents de plongée sont liés aux gaz et aux variations de pression. Les quatre principales pathologies en médecine de plongée comprennent: les barotraumatismes; les accidents de décompression (DCI); l'accident cardio-vasculaire et des effets pharmacologiques et toxiques de l'augmentation des pressions partielles des gaz. Les auteurs passent en revue quelques-uns des principes de la plongée et de la physiopathologie des accidents de plongée avant d'évoquer le traitement et la gestion de ces patients.	Intérêt limité pour notre expertise. Cet article n'apporte pas de données supplémentaires par rapport aux ouvrages de référence utilisés.

Doolette, D. J. and S. J. Mitchell (2011). "Hyperbaric conditions." Comprehensive Physiology 1(1): 163-201.	Revue générale sur le milieu hyperbare, en loisir et en professionnel. La revue introduit des rappels sur les lois physiques (pression, densité des gaz sous pression, loi de Boyle-Mariotte, loi de Henry). L'exposé reprend gaz par gaz les modifications induites par le milieu hyperbare.	Intérêt en parallèle des ouvrages de référence sur les principes généraux
DECOMPRESSION ET ACCIDENT DE DECOMPRESSION		
Francis, J. (2002). "Decompression sickness." Emergency Medicine 14(4): 358-363.	Cet article présente des cas cliniques pour des accidents de décompression consécutifs à des plongées.	Pas d'intérêt pour l'expertise
Lillo, R. S., E. C. Parker, *et al.* (1997). "Decompression comparison of helium and hydrogen in rats." Journal of Applied Physiology 82(3): 892-901.	Cette étude comparative chez l'animal (rats) concerne les risques liés à la décompression à l'He ou H_2. L'hypothèse selon laquelle il existe des différences de risques de décompression entre l'He et l'H_2 a été évaluée en examinant 1607 rats albinos mâles non anesthésiés soumis à des plongées sur 2% de O_2-équilibré par l'He ou 2% de O_2 équilibré par l'H_2 (fond < 50 ATA, temps < 60 min). Le potentiel de l'H_2 induisant des accidents de décompression s'est révélé jusqu'à 35% supérieur à celui de l'He.	Intérêt limité pour l'expertise. Les auteurs traitent des effets de l'hydrogène, gaz utilisé pour les plongées à saturation.
Reinertsen, R. E., V. Flook, *et al.* (1998). "Effect of oxygen tension and rate of pressure reduction during decompression on central gas bubbles." Journal of Applied Physiology 84(1): 351-356.	Cet article traite de la réduction de la vitesse de remontée et une augmentation de la tension d'O_2 dans l'air inspiré afin de réduire le risque de décompression. Il a été précédemment rapporté que la vitesse de décompression et la pression partielle d'O_2 sont corrélées linéairement pour la décompression humaine suite à des expositions hyperbares à saturation. L'étude a examiné la relation entre les taux de décompression, la pression partielle d'O_2 inspiré, et le nombre de bulles de gaz après 3 h de plongées à 500 kPa sous respiration nitrox avec une teneur en O_2 de 35 kPa.	Pas d'intérêt pour l'expertise. Les auteurs traitent de la plongée à saturation.
Vann, R. D., F. K. Butler, *et al.* (2011). "Decompression illness." The Lancet 377(9760): 153-164.	L'article discute les accidents de décompression et les traitements associés. Ces accidents sont provoqués par les bulles intra vasculaires ou extravasculaires formés à la suite de la réduction de la pression de l'environnement (décompression). Après des définitions, l'épidémiologie, le diagnostic, les auteurs décrivent le traitement en l'occurrence en premiers secours le traitement avec 100% d'oxygène puis un traitement de recompression à une pression accrue avec 100% oxygène. Des traitements d'appoint, sont également décrits.	Intérêt limité pour l'expertise. Cet article général sur les accidents de décompression n'apporte pas de données spécifiques sur les mélanges gazeux.
EFFETS OCULAIRES ET AUDITIFS		
Liepmann, M. E. (1981). "Accommodative and convergence insufficiency after decompression sickness." Archives of Ophthalmology 99(3): 453-456.	Les auteurs étudient les impacts sur la vue consécutifs à un accident de décompression afin de réaliser une étude chez l'animal. Douze plongeurs professionnels présentant des troubles visuels après un accident de décompression ont été inclus. De graves insuffisances d'accommodation et de convergence, jusqu'ici non reconnues, ont été détectées et étudiées. Deux singes rhésus ont été soumis à des conditions hyperbares similaires et ont ensuite été examinés avant leur sacrifice pour l'étude de leurs yeux et le cerveau. Les animaux ont semblé également avoir une insuffisance d'accommodation et de convergence.	Intérêt limité pour l'expertise. Cet article sur les impacts sur la vue liés aux accidents de décompression n'apporte pas de données spécifiques sur les mélanges gazeux.

Lin, C. D., I. H. Wei, *et al.* (2011). "Hyperbaric oxygen upregulates cochlear constitutive nitric oxide synthase." BMC Neuroscience 12.	La publication présente une étude chez l'animal en lien avec les effets de l'O_2 hyperbare sur la morphologie du tympan et la fonction auditive cochléaire dans le cadre d'une oxygénothérapie hyperbare. En effet, la thérapie par oxygène hyperbare est proposée dans le traitement des pathologies ischémique de l'oreille interne, les surdités brutales et les traumatismes aigus aux bruits. La prescription de cette thérapeutique dans les pathologies de l'oreille interne est controversée. L'étude fonctionnelle et cellulaire de cet article a pour but d'essayer d'élucider des résultats contradictoires, au travers du NO, et des nitrites oxyde synthases. Ce travail recouvre des barotraumatismes mineurs (9 tympans sur 10), sans séquelles significatives, l'absence d'atteinte du niveau d'audition et l'absence de mort cellulaire. Les résultats les plus intéressants sont l'augmentation des eNOS et nNOS dans certaines structures, qui pourraient avoir un effet bénéfique sur la protection des cellules de la cochlée et un effet de vasodilatation. Au contraire les iNOS qui pourraient avoir un effet toxique direct ne varient pas.	Intérêt limité pour l'expertise. Les auteurs soulignent l'utilisation transitoire de pression partielle élevée d'oxygène en thérapeutique avec un effet bénéfique vasculaire. L'expertise ne porte pas sur les bénéfices du traitement médical à l'oxygène
Peachey, J., M. F. Harrison, *et al.* (2010). "Changes in the standing potential of the eye under hyperbaric conditions." Comptes Rendus de L'Academie Bulgare des Sciences 63(3): 391-396.	Les auteurs étudient les effets de l'oxygène hyperbare (2,5 ATA, 100% oxygène) sur le potentiel de repos des cellules de la rétine, lors de la vision crépusculaire. Les données sont recueillis chez un groupe contrôle (12 sujets), et un groupe hyperoxie (12 sujets) (mormobaric air, hyperbaric air, hyperbaris 100% O_2). Les résultats suggèrent l'absence de différence significative entre les groupes et les situations. Le potentiel de repos des yeux n'est pas affecté par l'hyperbarie air ou l'oxygène en conditions hyperbares.	Intérêt pour l'expertise
Polkinghorne, *et al.* (1988). "Ocular fundus lesions in divers." Lancet 2(8625): 1381-1383.	Les auteurs étudient les effets chroniques sur la rétine de la plongée (activités subaquatiques). Ils comparent le fond d'œil de 84 plongeurs avec 23 non-plongeurs. Chez les plongeurs, 12 ont présenté des accidents de désaturation, dont 9 neurologiques. Des lésions sont retrouvées de façon significative chez les plongeurs par rapport aux non-plongeurs, que les plongeurs aient présenté ou non des accidents de décompression. La prévalence des lésions de l'épithélium pigmentaire augmente avec les années de plongée, aussi que les anomalies des vaisseaux (dilatation et micro anévrismes). Les auteurs ne peuvent attribuer ces variations aux accidents de plongée ou à d'autres causes. Mais parmi celles-ci la pression partielle du gaz inspiré pourrait avoir une influence (vasoconstriction sous l'augmentation de la pression absolue d'oxygène). Les auteurs ne signalent pas le type de mélange gazeux respiré habituellement par les plongeurs.	Pas d'intérêt pour l'expertise, l'article concerne les atteintes en lien avec la plongée en général sans précision des mélanges gazeux utilisés.
Vucetic, M., P. K. Jensen, *et al.* (2004). "Diameter variations of retinal blood vessels during and after treatment with hyperbaric oxygen." British Journal of Ophthalmology 88(6): 771-775.	Les auteurs présentent les effets de l'OHB sur les vaisseaux de la rétine. Les auteurs étudient les effets aigus sur les artères et veines de la rétine après des séances d'OHB type 'thérapeutique chronique' (5 séances par semaines de 90 minutes, à 2,5ATA, 100% O2), sur 3 sujets, à séances 1, 2, 3, 10, 20, 29, 30. Les auteurs concluent que l'OHB entraine une vasoconstriction, avec diminution du diamètre de 9,6% sur les artérioles et de 20,6% sur les veinules. 10 minutes après la fin du traitement les artérioles reviennent à 94,5% et les veinules à 89% du diamètre de la référence avant OHB. A noter, une diminution de la fréquence cardiaque et pas de variation des pressions systoliques, diastoliques ou moyennes. L'OHB entraîne des effets vasomoteurs soit en réponse d'auto régulation de cette circulation locale, soit comme conséquence des modifications cardio-vasculaires.	Intérêt pour l'expertise

EFFETS CARDIO-VASCULAIRES		
Al-Waili, N. S., G. J. Butler, *et al.* (2006). "Influences of Hyperbaric Oxygen on Blood Pressure, Heart Rate and Blood Glucose Levels in Patients with Diabetes Mellitus and Hypertension." Archives of Medical Research 37(8): 991-997.	Cet article présente les effets de l'OHB (2.5 ATA, PpO2 2.5 bars) sur la tension artérielle, la fréquence cardiaque et la glycémie chez 41 patients atteints d'hypertension artérielle et/ou de diabète. L'OHB provoque une augmentation de la pression artérielle systolique (11%) et diastolique (12%) et une diminution de la fréquence cardiaque (18%) et de la glycémie (21%) qui se majorent chez l'hypertendu et/ou le diabétique. La prise de bétabloquants accentue ces effets. Ces modifications sont provoquées par l'augmentation de l'activité parasympathique (ralentissement de la fréquence cardiaque) et de l'endothéline 1 (puissant vasoconstricteur). La vasoconstriction est majorée par l'augmentation des catécholamines et du thromboxane B2. Ces effets provoquent une augmentation de la pression artérielle, une diminution de la pré-charge du ventricule gauche, une augmentation de la post charge et une diminution de la fraction d'éjection systolique. D'autres mécanismes peuvent également influencer la pression artérielle comme l'effet de l'OHB sur le système rénine angiotensine. La diminution de la glycémie est provoquée par une augmentation de l'utilisation du glucose intracérébral et d'une sécrétion accrue d'insuline. L'hypoglycémie ainsi induite facilite la genèse d'une crise convulsive hyperoxique. L'OHB provoque également une augmentation significative des résistances ventilatoires, une diminution de la compliance, une diminution des volumes respiratoires, une diminution de la fréquence respiratoire et une diminution de la capacité vitale. Le risque d'iatrogénie est donc accru chez l'asthmatique.	Intérêt pour l'expertise
Evstropova, G. N. (1978). "Effect of prolonged exposure to hyperbaric conditions on myocardial electrical activity at rest and during work." Bulletin of Experimental Biology and Medicine 84(9): 1223-1226.	Cet article présente les effets d'une exposition hyperbare (1 semaine à 5 atmosphères à l'air) sur l'activité électrique du muscle cardiaque de 6 plongeurs professionnels au repos et à l'effort sur ergocycle avec augmentation progressive de la charge. L'hyperbarie provoque une diminution de la fréquence cardiaque au repos et à l'effort. La diminution de la fréquence cardiaque est en accord avec les données obtenues lors d'une exposition plus courte à l'air à 5 atmosphères ou lors d'une exposition prolongée au trimix à 6 atmosphères. La bradycardie est corrélée à l'augmentation de la PpO_2, mais pourrait être également consécutive aux conditions hyperbares qui majorent la densité des gaz et les pertes thermiques. Au repos en condition hyperbare, la durée RR et l'intervalle QT sont allongés. A l'effort, les conditions hyperbares majorent les contraintes cardiaques. L'amplitude de l'onde Pest augmentée probablement à cause de l'augmentation des résistances dans la circulation pulmonaire. L'amplitude de l'onde T est diminuée et l'intervalle ST déprimé. Certains plongeurs ont une détérioration du métabolisme myocardique et une perturbation dans l'activité automatique et dans la conductivité. La fréquence cardiaque ne permet pas d'évaluer l'intensité de l'effort en condition hyperbare.	Pas d'intérêt pour l'expertise. L'article traite des effets d'une exposition hyperbare sur l'activité du muscle cardiaque.
Guerrero, F., M. Lucciano, *et al.* (1997). "Hyperbaric-induced enhancement of noradrenaline-evoked contraction in rat thoracic aorta." Experimental Physiology 82(4): 687-695.	L'objectif de ce travail est d'évaluer l'impact de l'augmentation de la pression ambiante d'hélium sur la vasoconstriction induite par la noradrénaline chez le rat. Cette étude a également pour but de faire la part entre les effets liés à l'augmentation de la pression par rapport à ceux liés à l'augmentation de la pression partielle des gaz neutres. Ce travail montre qu'une augmentation de la pression ambiante d'hélium (7 MPa) provoque une augmentation de la force de contraction du muscle lisse de l'aorte chez le rat induite par la stimulation des récepteurs adrénergiques. L'azote limite la majoration de la force de contraction dans des conditions équivalentes.	Intérêt pour l'expertise

Lund, V. E., E. Kentala, *et al.* (2005). "Effect of age and repeated hyperbaric oxygen treatments on vagal tone." Undersea and Hyperbaric Medicine 32(2): 111-119.	Cette étude ouverte et contrôlée analyse les effets de l'âge et de la répétition de l'OHB (2,5 ATA) sur le tonus vagal (analyse de la variabilité de la fonction cardiaque) de 23 patients. L'augmentation de la PpO_2 majore l'activité parasympathique. L'OHB provoque la formation de péroxynitrite et ainsi diminue la biodisponibilité du NO (vasodilateur). L'augmentation de l'endothéline 1 majore la vasoconstriction. Les expositions répétées à l'OHB n'entrainent pas de changement permanent du tonus vagal. La réactivité du tonus vagal est conservée avec l'âge.	Intérêt pour l'expertise
Normand, J. C., J. P. Baud, *et al.* (1990). "Holter monitoring of face workers, in a hyperbaric cutting chamber during construction of the Lyon's metro." ENREGISTREMENTS HOLTER EN MILIEU HYPERBARE, AU NIVEAU DU FRONT DE TAILLE DU CHANTIER DU METRO DE LYON 51(5): 313-317.	L'utilisation d'une nouvelle technologie pour creuser des tunnels, le bouclier en bentonite, peut causer une lourde charge de travail physique lors de certaines tâches spécifiques. Douze ECG par Holter ont été réalisés alors que les travailleurs ont été nécessaires pour des interventions dans des conditions hyperbares. Même si dans la majorité des cas, la fréquence cardiaque est apparue modérée, elle a été particulièrement élevée pour certains cas, dans la chambre de coupe. Dans un cas sur 2, la fréquence cardiaque moyenne a été supérieure à 60% du maximum théorique de fréquence cardiaque pour l'âge de la personne. Il a également été constaté que la fréquence cardiaque «instantanée» était au-dessus du maximum des ressources humaines théorique pour 1 travailleur sur 3. Les résultats de cette étude indiquent que ces conditions de travail induisent un stress lourd sur le système cardio-vasculaire.	Pas d'intérêt pour l'expertise. L'article traite des contraintes physiques sur la fréquence cardiaque liées à une nouvelle technique pour les tunnels
Ratzenhofer-Komenda, B., H. Kovac, *et al.* (1998). "Quantification of the dermal vascular response to hyperbaric oxygen with laser-Doppler flowmetry." Undersea and Hyperbaric Medicine 25(4): 223-227.	Cette étude évalue l'effet de l'OHB (à 2.5 et 1.9 atm.) sur la vasoconstriction cutanée par l'intermédiaire d'un laser flux doppler chez huit volontaires sains. Il est également mesuré la $PtcO_2$, la $PtcCO_2$, la pression artérielle, la fréquence cardiaque, la fréquence ventilatoire, la saturation périphérique en oxygène et la température ambiante. Bien que la perfusion cutanée diminue de 76.5% en OHB (2.5 ATA), l'augmentation de la pression partielle d'oxygène provoque une augmentation de la fraction dissoute d'oxygène d'un facteur 20, objectivé la $ptcO_2$.	Intérêt pour l'expertise
EFFETS SUR LA CIRCULATION SANGUINE		
Stirban A, Lentrodt S, *et al.* (2009). "Functional changes in microcirculation during hyperbaric and normobaric oxygen therapy." Undersea and Hyperbaric Medicine 36(5): 381-390.	Cette étude analyse les effets de l'ONB et de l'OHB sur la microcirculation cutanée par $PtcO_2$, spectrophotométrie et laser flux doppler chez 7 sujets sains. L'ONB mais surtout l'OHB augmentent l'oxygénation tissulaire malgré la vasoconstriction.	Intérêt pour l'expertise

Buravkova, L. B. and Y. A. Popova (2007). "Effects of various hyperbaric gas mixtures on metabolic parameters of human blood." Human Physiology 33(5): 603-613.	Cette étude présente les effets sur les paramètres sanguins de l'hyperbarie, de l'hyperoxie et des mélanges à base d'hélium ou d'argon : >200m. Les auteurs indiquent une augmentation des TG, avec un effet majoré en présence d'argon, mais aucun effet pathologique. Les auteurs notent un dysfonctionnement hépatique transitoire en lien avec la pression.	Intérêt limité pour l'expertise. Les auteurs indiquent l'absence d'effet prolongé sur la fonction hépatique.
Sato, T., Y. Takeda, *et al.* (2001). "Changes in nitric oxide production and cerebral blood flow before development of hyperbaric oxygen-induced seizures in rats." Brain Research 918(1-2): 131-140.	Les auteurs présentent les effets de l'OHB sur le débit sanguin cérébral et le risque de crise convulsive hyperoxique. Cette étude animale démontre que le monitoring du débit sanguin cérébral est un bon indicateur du risque de crise convulsive hyperoxique. Il augmente avec la production de NO et sans lien avec la $PaCO_2$.	Intérêt pour l'expertise
EFFETS SUR LE SYSTEME RESPIRATOIRE		
Filipova, D. (1999). "Electromyographic activity of the respiratory muscles in hyperbaric conditions." Neuroscience and Behavioral Physiology 29(6): 639-644.	L'article présente les résultats obtenus à partir d'études électromyographiques des muscles inspiratoires dans des conditions imitant une chambre de pression en utilisant du néon et de l'hélium. Les plongeurs sont connus pour avoir des difficultés à respirer lorsque la densité du gaz respiratoire augmente. Cette étude investigue les éventuels mécanismes neurophysiologiques en lien avec les difficultés respiratoires dans des conditions de haute pression.	Article non disponible
Jammes, Y., H. Burnet, *et al.* (1988). "Bronchomotor response to cold air or helium-oxygen at normal and high ambient pressures." Undersea Biomed, Res 15(3): 179-192.	L'article présente une étude des effets chez l'Homme et l'animal de l'inhalation d'air froid ou d'un mélange d'hélium et d'oxygène sur la résistance pulmonaire (RL) à différentes pressions. 8 lapins ont été anesthésiés avec une trachéotomie sous une pression ambiante normale. Les 3 individus volontaires ont été soumis à des conditions normo et hyperbares. Chez les lapins ventilés artificiellement, une augmentation de la RL survint lorsque la température trachéale atteint 10°C. Cet effet était plus du double avec la respiration d'Hélium comparativement à l'air, malgré une moins grande perte de chaleur respiratoire par convection (Hc) avec l'Hélium. Chez les individus, l'inhalation d'air froid (8°C) au niveau de la mer n'a eu aucun effet sur la valeur de la RL. Toutefois, avec le mélange Hélium-azote-oxygène, une augmentation faible mais significative de la RL due à la respiration de gaz froid fut mesurée chez un sujet à 2 ATA et 2 individus à 3.5 ATA. La densité du mélange gazeux (air ou $He-N_2-O_2$) était presque la même dans les 3 cas mais la valeur de Hc augmentation avec l'Hélium. A 8 ATA, une augmentation de 30 à 55 % de la RL survint chez les 3 plongeurs durant l'inhalation de gaz froid et à 25 ATA, le spasme bronchique provoqué par le froid varie entre 28 et 95 %. Les auteurs concluent que la respiration d'Hélium renforce l'augmentation de la RL causée par le froid sous pression ambiante normale et élevée.	Intérêt pour l'expertise

Vera-Cruz, P., C. Zagalo, *et al.* (2009). "Chronic hyperbaric oxygen therapy causes only minor ultrastructural changes in the human nasal epithelium." European Journal of Anatomy 13(1): 7-10.	Les auteurs présentent une étude contrôlée chez l'Homme. Deux groupes de 9 individus ont été inclus dont l'un exposé à 15 séance d'oxygénothérapie hyperbare de 100 min afin d'évaluer les effets d'une exposition chronique à l'HBO sur l'épithélium nasal chez l'Homme. Les auteurs ont observé la muqueuse respiratoire suite à une biopsie d'échantillon. Ils notent des infiltrations modérées par des leucocytes et une augmentation de l'épaisseur de la membrane basale épithéliale. Par microscopie électronique à transmission, les auteurs ont observé qu'une minorité des cellules épithéliales nasales présentaient des altérations en raison du traitement. Ils concluent que le traitement induit des altérations mineures dans la muqueuse nasale qui semblent réversibles en cas de traitements discontinus.	Intérêt pour l'expertise
EFFETS SUR LA THERMOREGULATION		
Burnet, H., M. Reynaud-Gaubert, *et al.* (1992). "Relationship between inspired and expired gas temperatures in a hyperbaric environment." Respiration Physiology 90(3): 377-386.	Cette étude analyse les pertes thermiques chez trois plongeurs ventilant différents mélanges (héliox & hydrox) en conditions hyperbares. En normobarie, la perte de chaleur par les voies respiratoires est d'environ 10% de la production calorique métabolique. Elle s'effectue principalement par évaporation. En hyperbarie, les pertes par convection prédominent à cause de l'augmentation de la densité des gaz et de la capacité thermique molaire de l'hélium et de l'hydrogène, fréquemment utilisés en plongée profonde. Les pertes convectives sont 1,6 fois plus élevées lorsqu'ils ventilent un mélange froid hydrox par rapport à l'héliox.	Intérêt pour l'expertise
Fahlman, A., J. A. Kaveeshwar, *et al.* (2000). "Calorimetry and respirometry in guinea pigs in hydrox and heliox at 10-60 atm." Pflugers Archiv European Journal of Physiology 440(6): 843-851.	Cette étude utilise la calorimétrie directe et la respirométrie afin de mesurer le taux global de perte de chaleur (QΣ) et de la consommation d'oxygène (VO_2) chez des cobayes exposés à 1 atm (0,1 MPa) d'air et à 10-60 atm soit d'héliox (98% He, 2% de O_2) ou d'hydrox (98% de H_2, 2% de O_2). Les auteurs ont cherché à déterminer si les réponses physiologiques à ces deux mélanges de gaz étaient différentes et, dans l'affirmative, si les différences étaient attribuables aux caractéristiques thermiques des seuls gaz ou autres. Entre 10 et 40 atm, QΣ et VO_2 ne sont pas significativement différents pour les deux mélanges de gaz, alors qu'à 60 atm, QΣ et VO_2 étaient significativement plus élevés pour l'héliox que pour l'hydrox. Le ratio VO_2/QΣ suggère que les animaux ne sont pas en équilibre thermique en conditions hyperbares. En se basant uniquement sur les propriétés thermiques des deux mélanges de gaz, via un modèle mathématique, la perte thermique était plus élevée avec l'hydrox que avec l'héliox et ceci pour toutes les pressions. Deux hypothèses sont suggérées: L'une est une baisse de la température comme une réponse physiologique de l'animal au stress induit par l'hydrox, et l'autre est liée à la suppression de la narcose de l'animal par l'hydrox.	Intérêt limité pour l'expertise. Les auteurs traitent des effets de l'hydrogène, gaz utilisé pour les plongées à saturation.
Nuckols, M. L., J. L. Zumrick, *et al.* (1983). HEAT AND WATER VAPOR TRANSPORTATION IN THE HUMAN UPPER AIRWAYS AT HYPERBARIC CONDITIONS, Washington, DC, USA, ASME.	Les auteurs traitent des mécanismes de transfert de chaleur et de masse dans des modèles physiques de voies respiratoires de cadavres humains simulant des profondeurs de 305 m avec différents mélanges de gaz. Ces caractérisations offrent une compréhension détaillée des effets des pressions sur l'environnement, la composition du gaz les taux respiratoires (RMV) et sur la capacité de refroidissement du corps des voies respiratoires.	Article non disponible

EFFETS NEUROLOGIQUES		
Aviner, B. E. N., Y. Gnatek, *et al.* (2010). "Hyperbaric pressure effects on voltage-dependent Ca+2 channels: Relevance to HPNS." Undersea and Hyperbaric Medicine 37(5): 245-258.	L'étude traite des effets de la pression hyperbare sur les effets des courants des canaux calciques Ca^{2+} afin de tenter d'élucider leur rôle dans la survenue du syndrome nerveux des hautes pressions. Des expériences récentes ont essayé de mesurer directement le courant des ions Ca^{2+} dans des conditions de Haute Pression (HP), dont certaines contestent une à une de précédentes découvertes indirectes, mais soutiennent certaines découvertes du travail sur le comportement neuronal.	pas d'intérêt pour l'expertise, le SNHP (syndrome nerveux des hautes pressions) n'apparaissant pas en plongée autonome mais en plongée par système (> à 200 mètres)
Calvert, J. W., J. Cahill, *et al.* (2007). "Hyperbaric oxygen and cerebral physiology." Neurological Research 29(2): 132-141.	Les auteurs discutent de l'oxygénothérapie hyperbare. Après un rappel de la définition de l'UHMS (Société médicale hyperbare et plongée), les auteurs abordent les pathologies qui peuvent bénéficier de cette thérapie. Les mécanismes d'action n'étant toujours pas bien définis, certains praticiens hésitent encore à l'utiliser. Cet article récapitule les effets de l'OHB sur l'oxygénation cérébrale, le flux sanguin cérébral et la pression intra-crâniale, sur les deux cerveaux, sain ou blessé.	Pas d'intérêt pour l'expertise, les auteurs discutent des pathologies pouvant être traitées par oxygénothérapie hyperbare
Cevik, N. G., N. Orhan, *et al.* (2013). "The effects of hyperbaric air and hyperbaric oxygen on blood-brain barrier integrity in rats." Brain Research 1531: 113-121.	L'article présente les effets de l'air hyperbare (AHB) et de l'oxygène hyperbare (OHB) sur l'intégrité de la barrière sanguine cérébrale (BSC) chez le rat. L'intégrité de cette BSC a été évaluée fonctionnellement et structurellement en déterminant l'extravasation de traceurs comme le bleu d'Evans ou le HRP (horseradish peroxidase). Les résultats de l'étude suggèrent que l'AHB détériore l'intégrité de la BSC chez le rat sain aussi bien que l'OHB.	Pas d'intérêt pour l'expertise
De Mojà, C. A., M. Reitano, *et al.* (1987). "Anxiety, perceptual and motor skills in an underwater environment." Perceptual and Motor Skills 65(2): 359-365.	L'étude s'intéresse aux performances perceptives et motrices de 24 individus soumis à différents protocoles (phase 1 : surface puis phase 2 : plongée à 30 mètres). Ils ont été soumis à un test mesurant l'anxiété (state strait Anxiety Inventory, Form X-1) et un second évaluant les compétences psychomotrices (Pin Test) Les auteurs concluent que les plongeurs les moins expérimentés (moyenne 50 plongées / 2 années d'expérience) présentent des compétences psychomotrices inférieures. Aucune différence concernant l'anxiété n'a été observée.	Pas d'intérêt pour l'expertise
Kurita, A., H. Nagayoshi, *et al.* (2002). "Effects of severe hyperbaric pressure on autonomic nerve functions." Military Medicine 167(11): 934-938.	Les auteurs explorent les fonctions du système nerveux autonome sous haute pression hyperbare en mesurant la variabilité du rythme cardiaque et le taux d'excrétion de catécholamines chez 16 volontaires normaux présents dans des installations expérimentales sous-marines simulant une profondeur de 330 m en dessous du niveau de la mer.	Pas d'intérêt pour l'expertise

Li, K. C., X. C. Bao, *et al.* (2011). "Different activation of ERK1/2 and p38 with hyperbaric oxygen In dorsal root ganglion." Undersea and Hyperbaric Medicine 38(2): 149-153.	L'article présente le rôle des voies de fonctionnement intracellulaires comme l'ERK1/2 et le P38 dans le ganglion de la racine dorsale (GRD) après traitement à l'oxygène 100 % à une pression de 2.3 ATA durant deux, six et dix heures. Ainsi l'OHB à 2,4 ATA pendant 90 min a permis de diminuer significativement l'inflammation et la douleur après injection de Carrageenan et la phosphorylation d'ERK 1 et d'ERK2 dans les principaux neurones centripètes, en réponse à la stimulation nocive des neurones du GRD. Dans cette étude, le traitement du GRD avec l'OHB à 2.3 ATA durant 2h n'a pas changé le niveau de phosphorylation d'ERK 1 et d'ERK2. Mais après une exposition de 6h, les animaux ont présenté un syndrome de toxicité dans le SNC et dans les poumons. La toxicité de l'oxygène peut favoriser la sortie de médiateurs inflammatoires dans le GRD, qui peut alors mener à l'augmentation de la phosphorylation d'ERK 1 et d'ERK2 comme le démontre cette étude.	Intérêt pour l'expertise
Mor, A. and Y. Grossman (2006). "Modulation of isolated N-methyl-D-aspartate receptor response under hyperbaric conditions." European Journal of Neuroscience 24(12): 3453-3462.	Cet article traite de l'implication du récepteur NMDA du récepteur NMDA (N-Methyl-D-Aspartate) apparaissant grandement réduite en conditions hyperbares. Chez l'homme, la pression hyperbare induit le SNHP (syndrome nerveux des hautes pressions) caractérisé par des tremblements, des troubles du sommeil, etc. Chez les animaux, des pressions plus élevées entraînent des convulsions et la mort. Les auteurs ont étudié les effets à haute pression sur le potentiel post-synaptique excitateur de récepteurs NMDA pharmacologiquement isolés. Des échantillons de l'hippocampe de rats mâles Sprague-Dawley ont été préparés, constamment perfusés avec des solutions physiologiques, et soumis à des gaz saturés à la pression normobare et une pression de 10,1 MPa avec de l'hélium. Les auteurs présentent ensuite les réponses des récepteurs dans ces conditions hyperbares.	Pas d'intérêt pour l'expertise. Cet article complète la problématique du SNHP comme mécanisme d'hyperexcitabilité du SNC par la haute pression.
Mor, A. and Y. Grossman (2010). "The efficacy of physiological and pharmacological N-methyl-d-aspartate receptor block is greatly reduced under hyperbaric conditions." Neuroscience 169(1): 1-7.	L'article traite de l'efficacité physiologique et pharmacologique du récepteur NMDA (N-Methyl-D-Aspartate) apparaissant grandement réduite en conditions hyperbares. Les auteurs discutent des effets de la pression sur l'efficacité du blocage de l'ion magnésium Mg^{2+} et de l'AP5 (dl-2-Amino-5-phosphonopentanoic acid). Sous haute pression hyperbare, plus du double en quantité de Mg^{2+} et de l'AP5 ont été nécessaires pour obtenir des effets similaires concernant l'amplitude des réponses synaptiques des récepteurs NMDA. Les auteurs concluent que la pression hyperbare réduit l'efficacité de blocage des récepteurs NMDA, qui peut être associée avec des changements de conformité des récepteurs. Cela montre qu'il existe d'autres mécanismes de la pression sur l'activation des récepteurs NMDA. Confirmant nos précédents rapports, la modification significative de l'activité de ces récepteurs NMDA par la haute pression contribue à l'hyperexcitabilité du SNC et de sa possible vulnérabilité à long terme.	Pas d'intérêt pour l'expertise. Cet article complète la problématique du SNHP comme mécanisme d'hyperexcitabilité du SNC par la haute pression.
Mor, A., Y. Y. Kuttner, *et al.* (2012). "Pressure-selective modulation of NMDA receptor subtypes may reflect 3D structural differences." Frontiers in Cellular Neuroscience(SEPTEMBER): 1-9.	Les plongeurs profonds professionnels exposés à des hautes pressions supérieures à 1,1 MPa (100m) souffrent de SNHP, associé à l'hyperexcitabilité du SNC. Les auteurs rapportent maintenant dans cet article que la très haute pression (10.1 MPA, soit 1000 mètres) affecte de façon différente huit sous-types de récepteurs spécifiques NMDA. Ils concluent que les diverses réponses des récepteurs NMDA à la HP peuvent mener à des effets sélectifs de la HP sur différentes régions cérébrales. Ces découvertes demandent à aller plus loin, avec plus d'enquêtes spécifiques sur les effets délétères de la HP, et suggèrent le besoin d'une réévaluation des directives de sécurité pour la plongée profonde.	Pas d'intérêt pour l'expertise. Cet article complète la problématique du SNHP comme mécanisme d'hyperexcitabilité du SNC par la haute pression.

Mor, A., S. Levy, *et al.* (2008). "Differential effect of high pressure on NMDA receptor currents in Xenopus laevis oocytes." Diving and Hyperbaric Medicine 38(4): 194-196.	L'article traite de l'efficacité physiologique et pharmacologique du récepteur NMDA (N-Methyl-D-Aspartate) apparaissant dans le cadre du SNHP. Les auteurs évaluent l'impact des hautes pressions sur les courants ioniques des récepteurs NMDA. Les ARNc issus de récepteurs NMDA de l'hippocampe de mammifères (rats) NR1-1a / NR2A et NR1-1b / NR2A ont été injectés dans des ovocytes de *Xenopus laevis*, et les courants ioniques ont été enregistrés. L'analyse statistique a révélé que la haute pression a augmenté l'amplitude des courants NR1-1a / NR2A. En revanche, la haute pression a diminué l'amplitude des courants NR1-1b / NR2A. Ces résultats préliminaires montrent un fort effet de la pression différentielle sur les deux types de sous-unités NMDA. Ces résultats étayent l'idée que la réponse des récepteurs NMDA, en plus d'autres mécanismes, joue un rôle important dans le SNHP.	Pas d'intérêt pour l'expertise. Cet article complète la problématique du SNHP comme mécanisme d'hyperexcitabilité du SNC par la haute pression.
Rostain, J. C. and N. Balon (2006). "Diving: Barometric pressure and neurochemical mechanisms." La plongée: Pression barométrique et mécanismes neurochimiques 200(3): 257-263.	L'air comprimé ou les mélanges Nitrox peuvent induire la narcose à l'azote au-delà de 30 mètres. L'explication traditionnelle était que l'anesthésie ou la narcose arrivent quand le volume d'un site hydrophobe s'étend au-delà de l'absorption d'une quantité critique de molécules d'un gaz narcotique. L'observation de l'effet inverse de pression sur l'anesthésie générale a très longtemps soutenu la théorie des lipides. Mais récemment les théories sur les protéines ont pris une importance croissante car les résultats ont amené la preuve d'une interaction directe des protéines anesthésiques. La question est de savoir si la loi des gaz inertes est liée au processus des récepteurs des neurotransmetteurs sur les protéines. Les recherches, effectuées au niveau du ganglion basal du cerveau du rat, et plus particulièrement sur la voie nigro-striatale, impliquée dans les fonctions du contrôle moteur, locomoteur et cognitif, perturbée par la narcose et la pression, ont indiqué que la neurotransmission GABAergique est impliquée via les récepteurs GABA. Dans la conclusion sur la pression, les résultats suggèrent un changement de la sensibilité des récepteurs du GABAa et du GABAb dans la substance nigro réticulée et la substance nigro pars compacta. Ainsi les effets opposés de la pression et des gaz narcotiques sur les récepteurs GABAa pourraient être dus aux compositions de sous unités de différents récepteurs.	Intérêt limité pour l'expertise. Les auteurs discutent du mécanisme de la narcose mais sur un versant très scientifique. Pas de plus value par rapport aux ouvrages de référence.
Sonn, J., E. Meirovithz, *et al.* (2008). "Hyperbaric hyperoxia and the brain in vivo: The balance between therapy and toxicity." Journal of Innovative Optical Health Sciences 1(2): 185-193.	Cette étude chez l'animal s'intéresse aux effets sur le cerveau dus à l'hyperoxie hyperbare et discute l'équilibre optimal entre le traitement et la toxicité. Les protocoles d'oxygénation hyperbare (HBO) utilisent de faibles pressions jusqu'à 3ATA. Des pressions plus élevées peuvent provoquer des effets secondaires tels que des convulsions. la pression optimale permettant un traitement maximal et une toxicité minimale est controversée. Cependant, elle peut être évaluée d'après les auteurs en surveillant la distribution, la saturation, et la consommation d'oxygène. Dans cette étude, les auteurs ont mesuré certains paramètres (NADH mitochondrial et oxygénation de l'hémoglobine oxygénation (HbO_2)). Les rats ont été placés dans une chambre hyperbare et exposés à des pressions différentes. Les auteurs indiquent que la pression d'oxygène (au-dessus 2.5ATA) induit des effets neurologiques dans un délai à court terme après l'élévation de la pression.	Intérêt pour l'expertise

Weibing, X., Z. Qingling, *et al.* (1998). "Changes in human brainstem auditory evoked potentials during a 1,100 kPa He-O2 simulated saturation dive." Undersea and Hyperbaric Medicine 25(2): 111-114.	Quatre plongeurs ont été sélectionnés comme sujets pour conduire une plongée simulée en caisson à saturation à 1100 kPa (100m) au mélange Héliox-O_2. Les potentiels évoqués auditifs du tronc cérébral des plongeurs ont été contrôlés pendant les différents niveaux de l'exposition. À 1100kPa, tant avec les pics de 10 et 50 Hz, les latences interpics I-V ont été prolongées respectivement de 0,242 et 0,360 ms, indiquant l'impédance de la transmission synaptique. Cependant, la latence du niveau I a été raccourcie de 0,11ms, ce qu'on on a présumé être dû à la différence de vélocité de la transmission mécanique du son, en environnement hyperbare d'hélium. De façon intéressante, la latence du niveau I est prolongée graduellement durant l'exposition hyperbare à 1100 kPa. Ceci pourrait être utilisé dans les mesures des effets de la pression hydrostatique et de l'Hélium sur le système nerveux central. Ces changements couplés avec la transpiration accrue et la fatigue suggèrent que la pression de cette expérimentation ait certains effets sur le SNC des plongeurs, bien qu'ils soient modérés et provisoires.	Pas d'intérêt pour l'expertise, cet article aborde la problématique des potentiels évoqués auditifs en plongée simulée en caisson en saturation
	SECURITE DES TRAVAILLEURS	
Alves, M. M. P., J. V. Fornari, *et al.* (2013). "Evaluation of work security rules knowledge by large pipe workers." Avaliação do conhecimento das normas de segurança no trabalho por trabalhadores em tubulões pressurizados 11(1): 19-26.	Cet article, en langue Portugaise, évoque la problématique de la formation des travailleurs hyperbares au Brésil. Une étude sur les connaissances du risque hyperbare a été menée (juillet à décembre 2011) en raison du nombre important d'accidents de travail et d'arrêts maladie chez les travailleurs hyperbaristes. L'instrument de collecte des données consistait en un questionnaire de 29 questions relatives à la réglementation. 64 travailleurs ont participé à cette étude (âge moyen 33 ans +/- 8 ans et occupent diverses fonctions). Les résultats de l'enquête ont démontré le manque évident de connaissance sur le risque hyperbare. Il est nécessaire que les entreprises prennent la mesure du problème et qu'il soit nécessaire de mettre en place des programmes de formation appropriés avant que le travailleur n'occupe son poste de travail.	Pas d'intérêt pour l'expertise, situation difficilement transposable au contexte national.
	EFFETS ENDOCRINIENS	
Lund, V., E. Kentala, *et al.* (1999). "Effect of hyperbaric conditions on plasma stress hormone levels and endothelin-1." Undersea and Hyperbaric Medicine 26(2): 87-92.	Cet article présente une étude réalisée chez 8 plongeurs professionnels exposés à différentes conditions hyperbares en mesurant les concentrations plasmatiques d'hormones de stress (cortisol, épinéphrine, ADH, etc) et l'endothéline-1. Les individus ont été exposés à de l'air et de l'oxygène (100%) à 2.5 ATM pendant 60 minutes lors de différentes sessions. Les auteurs notent l'absence de différences significatives dues aux traitements et entre les traitements. Seules les concentrations de cortisol diminuent durant les traitements. Les auteurs concluent à l'absence de réaction de stress hormonal général pour ces deux traitements aux pressions considérées.	Intérêt pour l'expertise
Popova, Y. A., L. B. Buravkova, *et al.* (2008). "Effects of various hyperbaric gas mixtures on hormonal parameters of healthy human blood and saliva." Human Physiology 34(1): 103-113.	Les auteurs ont étudié les effets de différents mélanges gazeux en conditions hyperbares sur des paramètres hormonaux (cortisol total, hormones thyroïdiennes, TSH, corticotropine, insuline, etc) dans le sang et la salive de volontaires. Les individus ont été exposés durant des plongées pendant 3 à 18 jours à des mélanges gazeux hyperoxiques (oxygène/nitrogène/hélium) et contenant de l'argon (normoxique et hyperoxique). Dans la plupart des situations, les concentrations n'excédaient pas les intervalles normaux et cliniques. Une augmentation significative a été mesurée pour le cortisol total et la TSH sanguine durant les traitements hypoxiques oxygène/nitrogène et le mélange oxygène/nitrogène/argon.	Intérêt pour l'expertise

Tikkinen, J., A. Hirvonen, *et al.* (2011). "The effects of increased pressure, variation in inspired gases and the use of a mask during dry chamber dives on salivary cortisol in professional divers." Diving and Hyperbaric Medicine 41(4): 211-215.	Cette étude traite de l'activation du stress via la mesure de cortisol dans la salive (marqueur de l'axe hypothalamo hypophysaire) chez 89 hommes répartis en 3 groupes selon la pression, la teneur en O_2 et le port de masque. Les auteurs soulignent l'absence de groupe contrôle. Les auteurs indiquent une diminution de la sécrétion de cortisol mais pas de différence significative entre les groupes, il existe une forte variabilité individuelle et inter individuelle pour le cortisol.	Intérêt limité pour l'expertise en raison des limites de l'étude
Weist, F., G. Strobel, *et al.* (2012). "Arterial stress hormones during scuba diving with different breathing gases." Medicine and Science in Sports and Exercise 44(7): 1267-1274.	Cette étude porte sur 15 volontaires exposés à pression normale et 5.3 bars et différents mélanges gazeux : air, oxygène pur et Heliox21. L'objectif est d'analyser l'activité du système hypothalamo-hypophysaire et du système sympathique. Les auteurs ont mesuré la noradrénaline, l'adrénaline, la dopamine dans des échantillons de sang prélevés en direct ainsi que la mesure du rythme cardiaque et des concentrations de cortisol et ACTH. Les résultats indiquent l'absence de variation significative dépendante de la pression ou mélange des gaz.	Intérêt pour l'expertise
EFFETS BIOCHIMIQUES ET CELLULAIRES		
Adumitresi, C., N. Ceamitru, *et al.* (2009). "Changes of glutathione peroxidase and reductase activities during acute experimental hyperbaric stress." Archives of the Balkan Medical Union 44(1): 15-19.	Synthèse non disponible	Article non disponible
Naidina, V. P., Y. V. Pepelyaev, *et al.* (2009). "Changes in the higher fatty acid composition of blood plasma and erythrocyte membranes during long exposure of a human to hyperbaric gas medium." Human Physiology 35(4): 442-448.	L'article traite des effets chez l'homme de la respiration de gaz hyperbares (héliox - Néox) sur la composition en acides gras des membranes lipidiques des érythrocytes et du plasma sanguin lors de simulations de plongées profondes de longue durée. L'expérience a été réalisée en utilisation la méthode par chromatographie gaz chez des individus males sains exposés à des conditions simulant des plongées profondes (> 350 m) et exposés à des mélanges oxygène/hélium et oxygène/néon. Les auteurs notent des modifications et concluent que dans les conditions expérimentales et en période de réadaptation, les principaux changements concernent apparaissent dans la membrane de l'érythrocyte (augmentation du contenu en acides gras insaturés et variation des acides linoléiques et arachidoniques selon la profondeur de plongée). Les auteurs notent donc une adaptation des lipides de la membrane érythrocytaire suite à une exposition à des mélanges de gaz en conditions hyperbares simulant des plongées profondes.	Pas d'interêt pour l'expertise. L'étude simule des pressions correspondant à des plongées très profondes en dehors du périmètre de la Saisine.

Popova, J. and L. Buravkova (2006). "Blood biochemical parameters in women during long-term simulated hyperoxic diving up to 8 ATA." Undersea and Hyperbaric Medicine 33(3): 211-216.	Cette étude porte sur 3 femmes exposées à 8 ATA à un mélange oxygène-hélium-azote (teneur O2 0.45-0.5 ATA). Les auteurs ont mesuré un certain nombre de paramètres biochimiques (glucose, TGD, cholesterol, HDL cholesterol, urée, activité ASAT et ALAT, gammaGT). Aucune variation significative n'a été relevée avant et après. Les auteurs mentionnent une étude de Semko et al (1992) sur une étude à saturation à 5.1 MPa indiquant une augmentation des glucides et notamment métabolisme des lipides dépendant des gaz dans le mélange. Les auteurs ont observé des concertations élevées d'acides gras libres et une augmentation de l'activité des enzymes lipidiques sanguines et ont conclu que le catabolisme lipidique et glucidique était plus intense avec un mélange $He\text{-}O_2$ que mélange $He\text{-}N\text{-}O_2$	Intérêt limité pour l'expertise, l'étude est peu détaillée.
Taylor, L., A. W. Midgley, *et al.* (2012). "The effect of the hyperbaric environment on heat shock protein 72 expression in vivo." Research in Sports Medicine 20(2): 142-153.	L'étude porte sur 12 volontaires exposés à des expériences hypoxiques (simulation altitude) sur des périodes de 12 h avec pause de 3 pauses et ceci pendant 2 jours. Les auteurs ont mesuré l'expression d'une protéine de stress humaine HSP72.	Pas d'intérêt pour l'expertise. Les auteurs traitent d'une expérience hypoxique.
HYGIENE / INFECTIOLOGIE		
Barthelemy, L., C. Chastel, *et al.* (1980). "Hyperbaric pressure effects ('Per se' hydrostatic pressure, nitrogen and helium partial pressure) on the multiplication of a picornavirus (Echo 11) in cell cultures." ETTETS DE PRESSIONS HYPERBARES (PRESSION HYDROSTATIQUE 'PER SE', PRESSIONS PARTIELLES D'AZOTE ET D'HELIUM) SUR LA MULTIPLICATION D'UN PICORNAVIRUS (ECHO 11) EN CULTURE CELLULAIRE 28(3): 189-192.	Les auteurs ont étudié les effets de l'hyperbarie sur la multiplication virale (picornavirus (ARN virus) virus Echo 11) en culture cellulaire en conditions simulant des plongées profondes (21, 31 et 51 ATA). Les auteurs ont inoculé la culture cellulaire retenue par 100 doses infectieuses cytotoxiques (50 %) de virus Echo 11. Les cultures cellulaires infectées ont ensuite soumises aux différentes conditions hyperbares et, pour chaque condition, quatre conditions thermiques ont été soumises (26, 30, 33 et 36 °C). Les résultats indiquent que, quelles que soient les conditions hyperbares appliquées, le titre du virus obtenu à 24 h est plus faible pour les conditions pour les préparations soumises à la pression par rapport au titre des témoins exposés à la pression barométrique. D'autres résultats sont présentés par les auteurs sur la relation établie entre le logarithme du titre du virus et l'inverse de la température absolue de l'expérience.	Pas d'intérêt pour l'expertise. Les auteurs traitent du développement viral pour les grandes profondeurs.
Chen, S. H., R. Y. Chen, *et al.* (2012). "Multilocus sequence typing scheme of Pseudomonas aeruginosa isolates from naval divers." Academic Journal of Second Military Medical University 33(11): 1241-1244.	L'article traite du génotypage des souches de *Pseudomonas aeruginosa* (infections cutanées et auriculaires) prélevées chez des plongeurs de la marine en Chine.	Pas d'intérêt pour l'expertise. La problématique ne correspond pas au périmètre de la saisine.

Chen, S. H., R. Y. Chen, *et al.* (2012). "Microarray analysis and phenotypic response of pseudomonas aeruginosa PAO1 under hyperbaric oxyhelium conditions." Canadian Journal of Microbiology 58(2): 158-169.	L'étude s'intéresse aux mécanismes d'adaptation physiologique et de régulation de *Pseudomonas aeruginosa* (infections cutanées et auriculaires) dans l'induction de son potentiel infectieux en environnement oxyhélium hyperbare. Les auteurs ont mesuré les niveaux d'ARNm et l'expression de protéines de *Pseudomonas aeruginosa.* Les auteurs concluent que l'exposition à de l'oxyhélium en conditions hyperbares affecte l'expression du gène PAO1. Ces résultats permettent de définir des perspectives sur les mécanismes moléculaires d'une exposition à l'oxyhélium en conditions hyperbares contre l'adaptation de la virulence de de *Pseudomonas aeruginosa.*	Pas d'intérêt pour l'expertise. L'article s'intéresse aux conditions hyperbares saturées.
	EFFETS DIVERS	
Aitken, R. J., D. Buckingham, *et al.* (2000). "Impact of a deep saturation dive on semen quality." International Journal of Andrology 23(2): 116-120.	Les auteurs étudient les effets de la saturation sur la fonction reproductive (fertilité masculine via l'observation de la spermatogénèse et la viabilité des spermatozoïdes). L'étude s'inscrit dans un programme de 33 jours de plongée Durant lesquels les plongeurs ont été exposés à une pression maximale de 4.6 Mpa pendant 7 jours. Les auteurs observent une baisse importante de la qualité de la semence post plongée (82 jours) et concluent que les conditions extrêmes hyperbares associées à une profonde saturation impactent la fonction reproductrice male.	Pas d'intérêt pour l'expertise. L'article s'intéresse aux conditions hyperbares saturées.
Biersner, R. J., D. A. Hall, *et al.* (1976). "Associations between psychological factors and pulmonary toxicity during intermittent oxygen breathing at 2 ATA." Aviation Space and Environmental Medicine 47(2): 173-176.	Les auteurs ont étudié l'association entre les effets psychologiques et la toxicité pulmonaire de 4 individus soumis à une respiration intermittente d'oxygène à 2 ATA. Un autre individu témoin a été exposé à de l'azote normoxique. Les tests incluaient notamment des tests de mémoire à court terme concernant des associations simples ou complexes de mots, des tests simples ou complexes de performances psychomoteurs, et des modifications de l'humeur ressenties. Le paramètre de toxicité à l'oxygène était le nombre d'heures d'exposition intermittente à l'oxygène avant une réduction de 10 % des capacités vitales. La mémorisation à court terme pour les associations complexes de mots ainsi que les modifications d'humeur rapportées par les individus (dépression, fatigue, bonheur) ont été significativement corrélées avec les paramètres de toxicité à l'oxygène. Les facteurs de confusion étaient notamment l'absence de sommeil approprié due à l'expérimentation. Les auteurs indiquent la convergence de ces résultats avec d'autres études sur les effets psychologiques d'une respiration continue à l'oxygène en conditions hyperbares et à 1 ATA, notamment le fait que l'oxygène intensifie les effets de stress comme la fatigue.	Intérêt limité pour l'expertise. Cet article ancien basé sur 4 individus n'apporte pas d'information complémentaire par rapport aux ouvrages de référence présentés dans le rapport.
Nordahl, S. H. G., T. Aasen, *et al.* (2003). "Balance testing and Doppler monitoring during hyperbaric exposure." Aviation Space and Environmental Medicine 74(4): 320-325.	L'étude traite de la posture de volontaires dans différentes conditions en chambre (5 m heliox, 20 m air et 100 m heliox). Les auteurs indiquent l'absence de variation à 5 m héliox mais notent des modifications pour les deux autres.	Pas d'Intérêt pas pour l'expertise. Les auteurs discutent plutôt d'un effet hyperbare sur le système d'équilibre.

Seki, K. and M. Hugon (1977). "Subjective fatigue and performance deterioration in saturation hyperbaric conditions." FATIGUE SUBJECTIVE ET DEGRADATIONS DE PERFORMANCE EN ENVIRONNEMENT HYPERBARE A SATURATION 20(2): 103-119.	Cet article traite d'une étude sur la fatigue subjective et la dégradation des performances en environnement hyperbare à saturation (He et O_2). Trois individus ont exposés à 40 ATA à saturation en atmosphère He et O_2 et soumis à une enquête sur leur sensation de fatigue et la fréquence critique de papillonnement a été évaluée.	Pas d'intérêt pour l'expertise. L'article s'intéresse aux conditions hyperbares saturées.
POLLUANTS RESPIRATOIRES		
Flook, V. (2008). "Off-gassing of volatile hydrocarbons in hyperbaric environments." Underwater Technology 28(2): 57-66.	L'auteur discute de l'émission de COV dans les environnements hyperbares et des limites à appliquer pour ces polluants émis notamment par les matériaux (peintures, agents de nettoyage, mobilier, tuyaux d'approvisionnement des plongeurs, etc). Les personnes restent exposées en continu pendant de longues périodes à des pressions élevées et aucune prise en compte de ces polluants en général.	Pas d'intérêt pour l'expertise, l'étude concerne les équipements utilisés en plongée à saturation

Annexe 5 : Suivi des actualisations du rapport.

Date	**Version**	**Page**	**Description de la modification**
08/09/2014	01		Première version validée du rapport de l'Anses
22/09/2014	02	182	A l'issue des échanges avec la DGT qui se sont tenus au cours de la réunion de restitution du 17 septembre 2014, la formulation de la recommandation suivante a été modifiée : « Il est recommandé que les autorités compétentes *mettent en place des audits spécifiques pour l'hyperbarie professionnelle, afin de vérifier sur le terrain la bonne mise en œuvre de la réglementation* » est ainsi remplacé par « Il est recommandé que les autorités compétentes *organisent le contrôle de la mise en œuvre sur le terrain de l'encadrement adapté à l'utilisation des recycleurs et des mélanges, avec une surveillance prioritaire des mélanges à base d'hélium* ».
22/05/2015	03	31-36	Le chapitre 2.2.1 intitulé « Les pressions : définitions, lois physiques et concepts fondamentaux » a été repris en apportant certaines précisions dans les définitions et les concepts.
		38	Des précisions ont été apportées dans le chapitre 2.3.1 intitulé « Réglementation » et concernent les prescriptions pour le stockage des gaz.
		61-66	Le chapitre 2.4.5 intitulé « Tunneliers et sas de tunnelier » a été repris en apportant certaines précisions et procédant à certains ajustements



Agence nationale de sécurité sanitaire
de l'alimentation, de l'environnement et du travail
14 rue Pierre et Marie Curie
94701 Maisons-Alfort Cedex
www.anses.fr
www.anses.fr / @Anses_fr

ISBN : 979-10-286-0069-3 -Dépôt légal : juin 2015 – © Anses Éditions : juin 2015 – Création : Parimage ; réalisation : Anses Dicodis ; photo : Erwan Amice © CNRS- Date de publication : juin 2015